МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ КІРОВОГРАДСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

ТЕХНІКА В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОМУ ВИРОБНИЦТВІ, ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ

Випуск 15

Заснований в 2001 р.

Кіровоград 2004

УДК 62:631.3
ББК 34.751+32.965=31

Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, 2004, вип. 15 – 484 с.

В збірнику представлені статті, присвячені проблемам проектування та експлуатації сільськогосподарської техніки, технології виробництва, енергозбереження, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації по використанню результатів досліджень у галузях народного господарства.
Збірник є фаховим науковим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень вчених, аспірантів університету, а також інших навчальних закладів та промислових підприємств України.
Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ВНЗ, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку вченою радою Кіровоградського національного технічного університету від 25.09.2004 р., протокол №3.

Відповідальний редактор: д-р техн. наук, проф. Черновол М.І.

Редакційна колегія: Віхрова Л.Г, канд. техн. наук, доц. (науковий редактор за напрямком "Автоматизація"), Кропівний В.М., канд. техн. наук, доц. (заст. відп. редактора), Лопата Л.А., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар), Павленко І.І., д-р техн. наук, проф., (науковий редактор за напрямком "Галузеве машинобудування"), Пащенко В.Ф., канд. техн. наук, проф., Пестунов В.М., канд. техн. наук, проф., Сабірзянов Т.Г., д-р техн. наук, проф., Сидоренко В.В., д-р техн. наук, проф., Сисолін П.В., канд. техн. наук, проф. (науковий редактор за напрямком "Техніка в сільськогосподарському виробництві"), Шепельський М.В., д-р техн. наук, проф.

Адреса редакційної колегії: 25006, м. Кіровоград, пр. Університетський, 8, Кіровоградський національний технічний університет, тел.: 597-472, 597-437, 597-920, 55-10-49.

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація

Збірник наукових праць Кіровоградського
національного технічного університету

Випуск 15

Реєстраційне свідоцтво: серія КГ №0248-У від 07.03.2001 р.

© Кіровоградський національний технічний університет, 2004

УДК 621.311.1.018

И.В. Жежеленко, проф., д-р техн. наук, Ю.Л. Саенко, проф., д-р техн. наук,
Т.К. Бараненко, канд. техн. наук
Приазовский государственный технический университет

Генерирование интергармоник нелинейными нагрузками и методы их расчета

В статье приведен анализ интергармоник, генерируемых такими нелинейными резкопеременными нагрузками как дуговые сталеплавильные печи и сварочные установки. Рассмотрены различные методы оценки уровней интергармоник напряжений и токов как на зажимах указанных нагрузок при индивидуальной работе, так и в узлах электрической сети при их групповой работе.
интергармоники, дуговая сталеплавильная печь, сварочная машина, амплитудный спектр, быстрое преобразование Фурье, корреляционная функция

Многочисленные исследования в области качества электроэнергии, проводимые в течение последнего десятилетия как за рубежом, так и в нашей стране, показывают, что на современных промышленных предприятиях с большим числом нелинейных нагрузок наряду с проблемой высших гармоник (ВГ) должна рассматриваться и проблема интергармоник (ИГ). Связано это с тем, что влияние ИГ на электрические сети и потребителей электроэнергии может быть соизмеримым с влиянием ВГ, а в некоторых случаях оказывается более негативным [1].

ИГ появляются в результате модуляции основной частоты и высших гармонических составляющих любыми другими частотными составляющими и наблюдаются при работе таких нагрузок, как статические преобразователи частоты, асинхронные двигатели, асинхронные преобразовательные каскады, дуговые печи, различные сварочные установки и все нагрузки, имеющие частоту, отличную от основной [2].

К основным источникам ИГ можно отнести различного вида статические преобразователи частоты, в первую очередь циклоконверторы или, как принято их называть в отечественной литературе, непосредственные преобразователи частоты (НПЧ), и нагрузки, в основе работы которых лежит явление горения дуги [2, 3]. Причиной появления ИГ, генерируемых преобразователями частоты, являются электромагнитные процессы, протекающие при работе этих устройств, связанные с формированием кривых напряжений и токов на выходе. При этом процессы изменений токов (напряжений) преобразователей частоты можно рассматривать как периодические и, следовательно, их спектры являются дискретными. В связи с этим за рубежом накоплен достаточно большой материал по исследованию ИГ, источниками которых являются преобразователи частоты (циклоконверторы), что нашло свое отражение в документе [3]. Авторами получены аналитические выражения и разработаны численные методы для оценки амплитуд ИГ, генерируемых НПЧ различного типа [4-6].

К нагрузкам, в основе работы которых лежит явление горения дуги, относятся дуговые сварочные аппараты и дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Дуга обладает нестабильной нелинейной вольт-амперной характеристикой. В результате горения дуги происходят колебания и искажение формы кривой напряжения питающей сети, появляются различные по фазам искажения кривых токов [1, 7]. Эти искажения носят случайный характер и являются причиной появления ИГ. Случайный характер возникновения ИГ затрудняет их расчет и анализ.

Целью настоящей работы являются анализ ИГ, генерируемых такими нелиней-

© И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко. 2004

ными нагрузками, как ДСП и сварочные установки, и рассмотрение различных методов их оценки.

При экспериментальном исследовании процессов возникновения ИГ для оценки их амплитуд и частот целесообразно применение быстрого преобразования Фурье (БПФ) непосредственно к огибающим кривых графиков действующих значений токов и напряжений [8]. Очевидно, что такое разложение характеризует гармонический состав конкретной реализации случайного процесса на интервале стационарности. В качестве примера на рис. 1, *а* приведен график изменения тока фазы *В* печи ДСП-100 на участке стационарности длительностью 60 с; на рис. 1, *в* – спектр действующих значений тока представленного графика. Дискретный спектр был получен путем гармонического анализа с использованием БПФ. Из рассмотрения дискретного спектра следует, что ИГ тока проявляются в диапазоне 0-2,5 Гц.

При применении БПФ к непериодическому процессу величины амплитуд гармонических составляющих дискретного спектра зависят от выбранного шага дискретизации $\Delta t = 1/T$, где T – промежуток времени, на котором задан случайный процесс. С уменьшением Δt амплитуды также пропорционально уменьшаются и наоборот. В то же время, как показали исследования, дисперсия процесса практически не зависит от Δt, т. е. является постоянной. Таким образом, применение БПФ непосредственно к графику изменения кривой тока (напряжения) позволяет оценить энергию случайного процесса (энергию ИГ) и получить общее представление о распределении ИГ по оси частот, а также выделить полосу частот, характерную для данного источника.

Рассмотрим возможность применения БПФ не к графику случайного процесса, а его корреляционной функции (КФ). В ряде случаев КФ случайных процессов изменений токов нагрузок ДСП являются незатухающими, что свидетельствует о неэргодичности случайных процессов. Одной из наиболее характерных причин неэргодичности стационарного случайного процесса является наличие в нем периодических составляющих. При работе ДСП периодические составляющие появляются, в первую очередь, за счет работы автоматического регулятора мощности, поддерживающего заданное значение тока.

Незатухающая часть КФ (так называемый «хвост» КФ) содержит те же частоты, что и сам случайный процесс [9]. В связи с этим для анализа спектрального состава низкочастотных периодических составляющих тока нагрузки целесообразно применить БПФ не к самому случайному процессу, а к «хвосту» КФ, что обеспечит фильтрацию периодических составляющих от случайного процесса.

Представим ток нагрузки в виде суммы случайного процесса $I_1(t)$ с затухающей КФ и низкочастотных периодических составляющих [9]

$$I(t) = I_1(t) + \sum_{k=1}^{n} I_{mk} \sin(\omega_k t + \varphi_k), \qquad (1)$$

где I_{mk} - постоянные амплитуды периодических составляющих случайного процесса изменения тока нагрузки;

ω_k - частоты периодических составляющих;

φ_k - начальные фазы.

Оценка КФ случайного процесса определяется выражением

$$K_I(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} (I(t) - m_I)(I(t+\tau) - m_I) dt, \qquad (2)$$

где m_I - математическое ожидание случайного процесса.

Оценка КФ по выражению (2) является достоверной при $\tau < T/5$ [9], так как при

больших значениях τ погрешность оценки КФ возрастает.

Если интервал измерения T намного больше периода $2\pi/\omega_k$ наименьшей из низкочастотных составляющих, то выражение (2) можно представить в виде

$$K_I(\tau) = K_{I1}(\tau) + \sum_{k=1}^{n} \frac{I_{mk}^2}{2} \cos \omega_k \tau \,, \qquad (3)$$

где $K_{I1}(\tau)$ - КФ случайного процесса.

Таким образом, если в случайном процессе изменения нагрузки присутствуют синусоидальные составляющие, то «хвост» КФ представляет собой сумму косинусоид тех же частот, амплитуды которых равны половине квадрата амплитуд синусоидальных составляющих графика нагрузки.

На рис. 1, *б* представлена КФ графика нагрузки фазы *B* печи ДСП-100. Вид КФ свидетельствует о наличии в графике нагрузки периодических составляющих. На рис. 1, *г* приведен спектр квадратов ИГ, полученный в результате гармонического анализа посредством БПФ «хвоста» КФ.

В результате расчетов получено, что доля энергии периодических составляющих в случайном процессе изменения тока нагрузки фазы *B* печи ДСП-100 составляет 18,8 % от общей энергии случайного процесса. Для фаз *A* и *C* доля энергии периодических составляющих соответственно равна 21 % и 17 %.

Как показали многочисленные исследования, для ДСП емкостью 200 т характерны подобные соотношения, что позволяет считать представленные результаты представительными и достаточно общими. Для ДСП меньшей емкости доля периодических составляющих оказывается несколько большей.

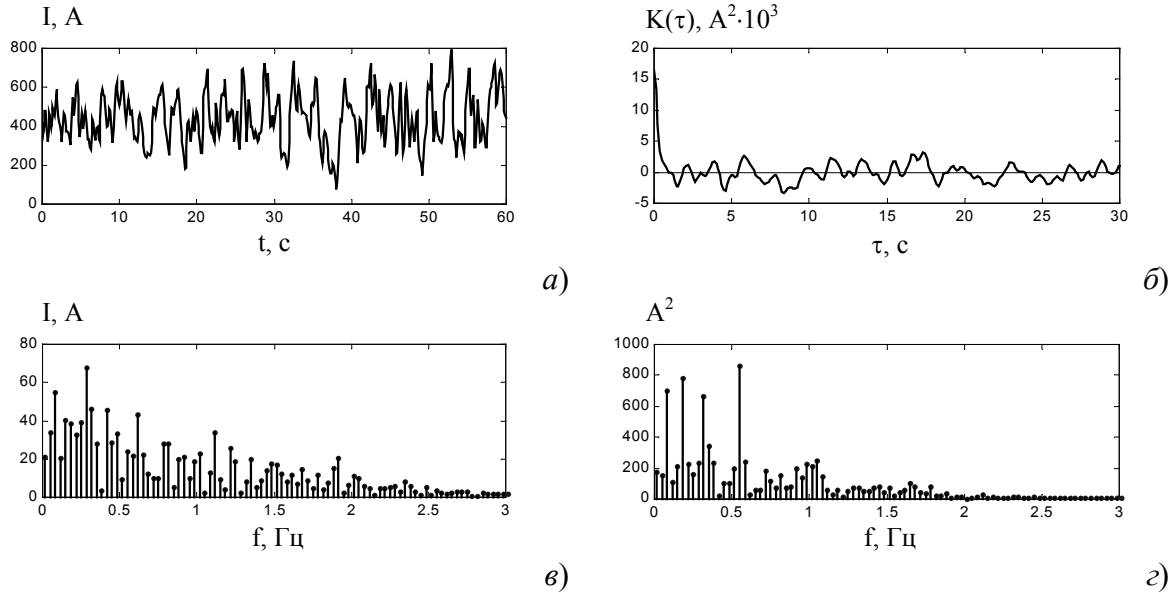


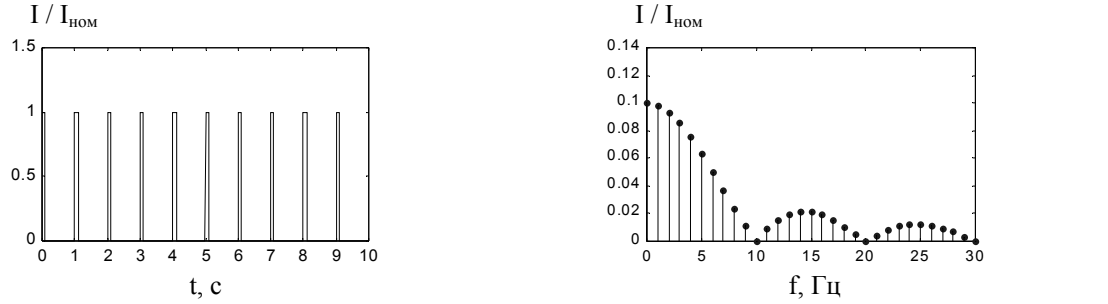
Рисунок 1 - График тока нагрузки фазы *B* печи ДСП-100 *а*), его КФ *б*), амплитудный спектр графика тока нагрузки *в*) и результат БПФ «хвоста» КФ *г*)

Указанный подход к исследованию ИГ справедлив для любого вида резкопеременной нелинейной нагрузки и может быть использован для анализа графиков токов нагрузок различных сварочных установок.

Анализ работы различных типов сварочных машин показывает, что для всех видов электрической сварки потребление сварочного тока носит импульсный характер со случайными или детерминированными видоизменениями в чередовании импульсов и их формы. Рассматривая генерирование ИГ сварочными установками, следует различать индивидуальные и групповые графики их нагрузки. Групповые графики представ-

ляют собой чередование как одно-, так и многоступенчатых импульсов. Одноступенчатый импульс в групповом графике является импульсом какой-то одной сварочной машины; многоступенчатый импульс образуется при совпадении работы нескольких сварочных машин путем наложения их импульсов. Продолжительности отдельных ступеней групповых импульсов составляют порядка 0,02 – 0,4 с [10]. В общем случае дискретный случайный процесс $I(t)$ для сварочных нагрузок является нестационарным. Однако в этом нестационарном процессе можно выделить участки стационарности длительностью от 30 мин до 2 ч, соответствующие установившемуся процессу производства [10]. При записи групповых графиков с помощью самопишущих приборов происходит сглаживание отдельных ступеней импульсов, в результате чего они представляют собой случайные функции [10]. Таким образом, групповые графики нагрузок сварочных установок аналогичны случайным графикам нагрузок ДСП.

Несколько иная картина наблюдается при индивидуальной работе сварочных машин (или небольшого их количества). На рис. 2 приведен периодический импульсный график нагрузки и соответствующий амплитудный спектр ИГ, полученный с помощью БПФ, многоточечной сварочной машины при времени цикла $T_ц$ = 10 с и коэффициенте включения $k_в$ = 0,1.



а) *б*)

Рисунок 2 - Периодический импульсный график нагрузки многоточечной сварочной машины *а*) и соответствующий амплитудный спектр *б*)

График, приведенный на рис. 2, *а*, представляет собой регулярный поток одиночных импульсов тока [10]. В этом случае спектр ИГ является дискретным. На практике чаще встречаются графики, представляющие собой случайные последовательности групп импульсов тока.

На рис. 3 приведены: случайный периодический график многоточечной сварочной машины при времени цикла $T_ц$ = 10 с и коэффициенте включения $k_в$ = 0,1 и его КФ; а также результаты применения БПФ к графику нагрузки и КФ. Из рис. 3, *в* видно, что амплитудный спектр ИГ содержит случайную составляющую (вид которой зависит от выбранного шага дискретизации) и дискретную составляющую, частоты и амплитуды которой зависят от параметров сварочной машины. Представленные выше результаты принципиально не отличаются от характерных для других типов сварочных машин (шовных, стыковых и др.).

В результате многочисленных исследований установлено, что при работе ДСП и различных сварочных установок доля энергии дискретного спектра ИГ в среднем составляет 10-25 % общей энергии смешанного спектра.

Одним из путей исследования ИГ электротехнологических установок является моделирование случайного процесса изменения нагрузки по заданным или известным его характеристикам [11, 12].

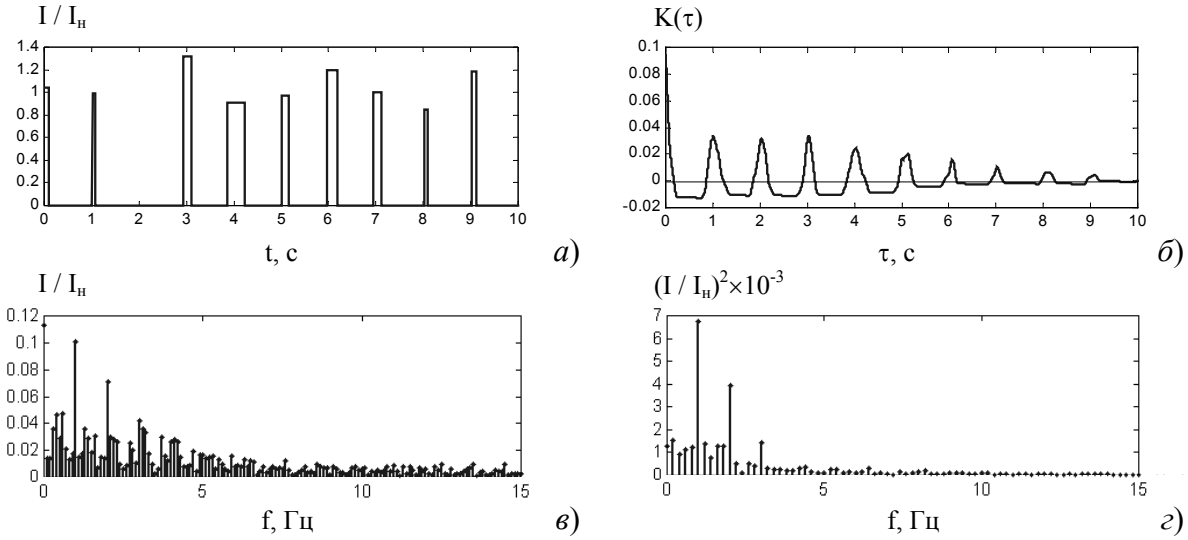


Рисунок 3 - Случайный периодический график нагрузки многоточечной сварочной машины *а*); его КФ *б*); амплитудный спектр графика нагрузки *в*) и результат БПФ его КФ *г*)

Моделирование позволяет получить графики сетевых токов исследуемых резкопеременных нелинейных нагрузок, которые могут быть представлены в виде амплитудно-модулированных колебаний, т.е. в виде суммы основной и ВГ, модулированных случайным процессом [11]:

$$i(t) = [\xi(t) + 1] \sum_{\nu=1}^{\infty} I_{m\nu} \sin(\nu\omega_0 t + \phi_\nu), \tag{4}$$

где $\xi(t)$ - центрированный стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и заданной КФ;

$I_{m\nu}$, ω_0, ϕ_ν - постоянные амплитуды, угловая частота и взаимно независимые случайные начальные фазы, равномерно распределенные на интервале $(-\pi, \pi)$.

В качестве примера на рис. 4 приведены: смоделированный график сетевого тока многоточечной сварочной машины при времени цикла $T_ц$ = 10 с (на рисунке показан участок длиной 5 с) и его амплитудный спектр, полученный посредством БПФ.

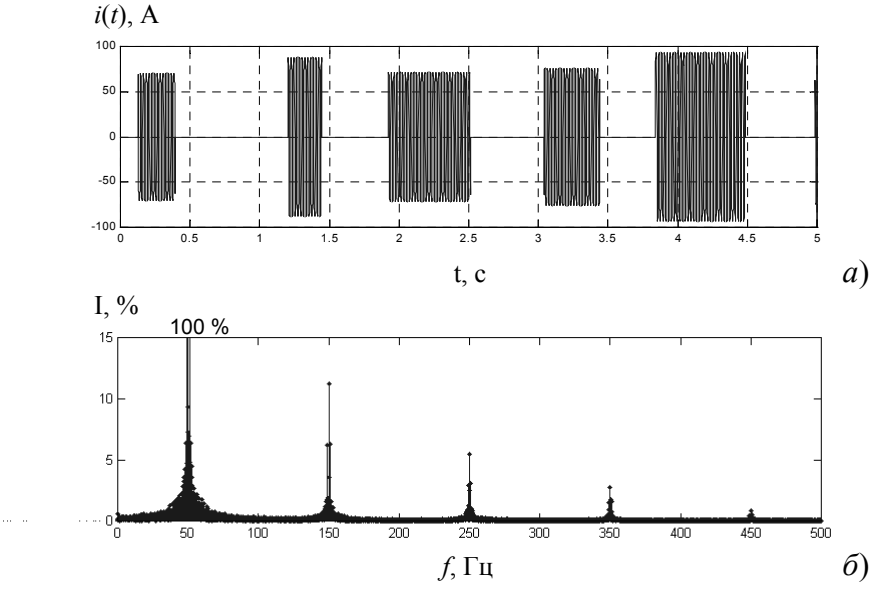


Рисунок 4 - График сетевого тока многоточечной сварочной машины *а*) и его амплитудный спектр *б*)

Так как кривые токов и напряжений при работе ДСП и сварочных машин носят случайный характер, т.е. являются непериодическими, то разложение в ряд Фурье для количественной оценки амплитудного спектра ИГ неприемлемо. В связи с этим целесообразно перейти от разложения в ряд Фурье к преобразованию Фурье, которое позволяет получить спектр непериодической функции. Учитывая вероятностную природу происхождения ИГ, для их анализа целесообразно использовать спектрально-корреляционную теорию стационарных случайных процессов, в основе которой лежит прямое преобразование Фурье, связывающее КФ процесса и его энергетический спектр (спектральную плотность) [11].

Рассматривая случайный процесс изменения тока нагрузки на некотором достаточно большом интервале времени T с учетом известного соотношения между его спектральной плотностью $S_i(\omega)$ и спектральной функцией $G_i(\omega)$

$$S_i(\omega) = \frac{G_i^2(\omega)}{2\pi T}, \tag{5}$$

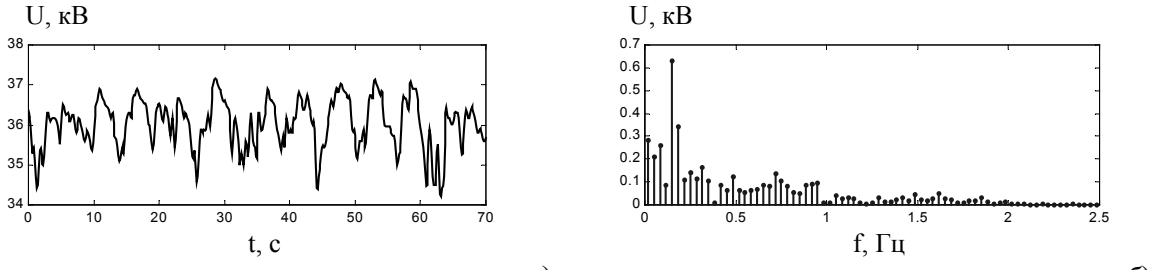
можно определить его амплитудный спектр аналогично определению амплитудного спектра периодического процесса [13]:

$$I(\omega) = 2\sqrt{\frac{2\pi}{T} S_i(\omega)}. \tag{6}$$

Предложенная методика расчета амплитудного спектра ИГ позволяет распространить существующую методику расчета ВГ тока и напряжения в узлах ЭС промышленных предприятий на расчет ИГ, используя метод узловых напряжений [13].

Проведенные многочисленные расчеты показали, что уровни напряжений ИГ в узлах ЭС промышленных предприятий не превышают 10 % уровней ВГ (как правило, являясь значительно меньше). Следовательно, при расчетах показателей несинусоидальности напряжения сплошной спектр ИГ, связанный со случайными изменениями токов и напряжений резкопеременных нелинейных нагрузок, может не учитываться. Однако следует отметить, что сплошной спектр ИГ может оказывать существенное влияние на показатели колебания напряжения, в частности на дозу фликера. В то же время какие-либо аналитические соотношения между параметрами спектра ИГ и параметрами, с помощью которых оцениваются колебания напряжения (дозы фликера), не имеют места. Однако снижение уровней колебаний напряжения в сети приводит к существенному снижению уровней ИГ напряжения и ширины их спектра.

ИГ напряжения могут быть получены путем гармонического анализа огибающей графика действующих значений (амплитуд) напряжения, иными словами, кривой колебаний напряжения, или на основе подобия случайных процессов изменений тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$, связанных между собой законом Ома. На рис. 5, *а* в качестве иллюстрации представлена осциллограмма колебаний линейного напряжения на шинах 35 кВ, питающих печь ДСП-100, а на рис. 5, *б* – дискретный спектр этой кривой.



а) *б*)

Рисунок - 5 Колебания линейного напряжения на шинах 35 кВ, питающих печь ДСП-100 *а*) и его дискретный спектр *б*)

Выводы

–разложение графика случайного процесса изменения тока (напряжения) резкопеременной нелинейной нагрузки с помощью БПФ позволяет оценить энергию процесса (энергию ИГ) и получить огибающую амплитудного спектра ИГ, но не дает представления об уровнях ИГ, так как они зависят от выбранного шага дискретизации случайного процесса. Применение БПФ к «хвосту» КФ позволяет выделить дискретную часть смешанного спектра ИГ при наличии периодических составляющих в случайном процессе изменения тока (напряжения) резкопеременной нелинейной нагрузки;

–для анализа и расчета ИГ, генерируемых электротехнологическими установками, целесообразно использовать спектрально-корреляционную теорию стационарных случайных процессов;

–связь между параметрами спектров колебаний напряжения и принятыми европейским стандартом характеристиками колебаний напряжения (кратковременная и длительная доза фликера) в явном виде отсутствует, однако, учитывая зависимость между параметрами колебаний напряжения и уровнями ИГ, представляется целесообразным выявить соответствующую аналитическую зависимость.

Список литературы

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
2. Interharmonics in power systems / IEEE Interharmonic Task Force, Cigré 36.05/CIRED 2 CC02 Voltage Quality Working Group. – 1997. – P. 1-9.
3. IH0101 IEEE: Interharmonics Task Force Working Document. – 2001. – 12 с.
4. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. Метод расчета интергармоник входного тока трехфазно-однофазных непосредственных преобразователей частоты при линейном законе управления // Вісник ПДТУ. – Маріуполь, 2003. – №13. – С. 227-232.
5. Zhezhelenko I.V., Sayenko Y.L., Baranenko T.K. Calculation of interharmonics in power systems with direct frequency converters // Proc. 7th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU'03). – Cracow (Poland), 2003. – P. 195-199.
6. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. Спектральный состав выходного напряжения и входного тока непосредственных преобразователей частоты // Вісник НУ "Львівська політехніка": Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2003. – № 479. – С. 79-87.
7. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / Ю.Л. Рыжнев, Р.В. Минеев, А.П. Михеев, М.Я. Смелянский; под. ред. М.Я. Смелянского и Р.В. Минеева. – М.: Энергия, 1975. – 185 с.
8. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. Анализ интергармоник промышленных нагрузок // Proc. of III International Symposium "New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial implementation". – Zakopane (Poland), 2003. – P. 243-246.
9. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. – М.: Наука, 1968. – 368 с.
10. Вагин Г.Я. Режимы электросварочных машин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 111 с.
11. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. Вероятностный подход к анализу интергармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий // Зб. наук. пр. IV Міжнар. наук. конф. "Ефективність і якість електропостачання промислових підприємств". – Маріуполь, 2000. – С. 33-36.
12. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. Математические модели источников интергармоник и их реализация в среде MATLAB // III Międzynarodowe seminarium polsko-ukraińskie "Problemy elektroenergetyki". – Łódź (Polska), 2002. – P. 31-37.
13. Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. Спектральный метод расчета интергармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий // Сб. докл. первой междунар. науч.-практ. конф. "Вычислительная техника в информационных и управляющих системах". – Мариуполь, 2000. – С.136-137.

УДК 621.314.621.382

Д.И. Родькин, проф., д-р техн. наук
Кременчугский государственный политехнический университет

Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами

На основании существующих методов определения реактивной мощности электрических сигналов показана ошибочность использования понятия полной или кажущейся мощности. Показано, что использование показателей по мгновенной мощности позволяет учесть все без исключения составляющие. Показано, что при использовании полной мощности полигармонических сигналов Закон сохранения не соблюдается. Предложена методика оценки составляющих мгновенной мощности, включающей в себя все компоненты произведения полигармонических сигналов напряжения и тока. Показано, что дальнейшая разработка теории энергопроцессов потребует изменения методик оценки эффективности энергопроцессов, повышения информативности получаемых результатов.
теория энергопроцессов, мгновенная мощность, рациональная система показателей энергопроцессов

Методология оценки энергетических процессов сложилась в начале прошлого столетия и мотивировалась с одной стороны практическими потребностями и имеющимися возможностями – с другой [1,2]. Значительный интерес к развитию исследований энергопроцессов наблюдался в связи с освоением вентильных устройств и систем, характеризующихся несинусоидальными напряжениями и токами [3,4]. В последнее время интерес к этому вопросу возрос в связи с появлением измерительных комплексов на базе разнообразных вычислительных устройств. Достаточно сказать, что за 10-12 лет практически обновился парк измерительных устройств, предназначенных для промышленного учета электрической энергии. Следует отметить также что объективный интерес к качеству электрической энергии вызвал поток исследований и публикаций, затрагивающих с той или другой стороны энергетическую сторону процессов [1,2].

В ряде исследований, посвященных проблематике энергетических процессов, отмечалось, что в вопросах анализа имеются недостатки существующих подходов к оценке энергетических режимов [2,5]. Здесь прежде всего следует отметить критические замечания по поводу использования понятия полной или кажущейся мощности, искусственности приемов при определении реактивной, неактивных составляющих полной мощности и т.п. Фундаментального анализа причин полученных несоответствий не было выполнено, что, естественно порождало большое число представлений, но не разрешало проблему в целом.

В зарубежной литературе за последние десять лет появился ряд публикаций, меняющих методологическую основу подходов при оценке энергопроцессов. Понятие полной мощности было исключено из числа «столпов» на которых строилась существующая теория. Кроме активной мощности получили свое гражданство синусная и косинусная составляющие. Детально этот вопрос анализировался и авторами в публикациях [6,7].

Для уяснения случившегося поворота в теоретических представлениях отметим, что полная мощность равна произведению действующих значений напряжения и тока:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I\,, \qquad (1)$$

© Д.И. Родькин. 2004

где $U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U^2(t)dt}$; $I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I^2(t)dt}$ - действующие значения напряжения и тока;

T - период гармонического сигнала; $U(t), I(t)$ - зависимости тока и напряжения.

Обратившись к реальному физическому процессу получим выражение для мгновенной мощности синусоидальных сигналов [8]:

$$P(t) = \sqrt{2}U\cos\Omega t \cdot \sqrt{2}I\cos(\cos\Omega t - \varphi) = UI\cdot\cos\varphi + UI\cdot\cos\varphi\cdot\cos 2\Omega t + \\ + UI\cdot\sin\varphi\cdot\sin 2\Omega t = P_0 + P_a\cos 2\Omega t + P_b\sin 2\Omega t, \quad (2)$$

где U, I - действующие значения напряжения и тока;

P_0 - активная мощность;

P_a, P_b - амплитуды знакопеременных квадратурных составляющих мгновенной мощности.

Отметим, что понятие мгновенной мощности, величины, наиболее полно отражающей энергетический процесс, практически не используется кроме операции определения активной составляющей мощности.

Как следует из (1) и (2) в качестве полной мощности использованы два последних члена в (2), благодаря чему S можно представить в форме вектора, вращающегося с угловой скоростью 2Ω. При этом обе составляющие образуют ортогональную систему. Математически это привлекательно, но не отвечает физическому процессу, при котором активная мощность выступает в форме скалярной величины $P = U\cdot I\cos\varphi$. Для того, чтобы получить желаемый результат, необходимо было каким-то образом превратить третью составляющую величину в (2) в постоянную составляющую. Математически это выполняется с помощью преобразования Гилберта [1,9]. Сущность этой математической операции в том, что одна из компонент (напряжение или ток), входящих в выражение мгновенной мощности, смещается относительно другой на угол $\pi/2$. Это позволяет получить интегральное значение, не равное нулю произведения двух величин, сдвинутых друг относительно друга на четверть периода. Несомненно – это искусственный прием в оценке энергетических показателей. Сделано это, как указывалось, для получения составляющих мощности в форме двух скалярных величин:

$$P_0 = \frac{1}{T}\int_0^T U(t)\cdot I(t)dt; \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{T}\int_0^T U(t)\cdot H_i(I(t))dt = \frac{1}{T}\int_0^T I(t)\cdot H_u(U(t))dt,$$

где H_i, H_u - преобразование Гилберта соответствующих величин тока и напряжения.

Следует указать, что при наличии полигармонического характера зависимостей $U(t)$ и $I(t)$ преобразование Гилберта необходимо осуществлять для каждой гармоники в отдельности, т.е. сдвигать соответствующую кривую на угол $\pi/2$ в радианной мере соответствующей гармоники.

Достаточно близким по сути рассматриваемого метода является метод определения реактивной мощности, заключающийся в использовании выражений [3]:

$$Q = \frac{1}{\omega T}\int_0^T U(t)\cdot\frac{dI(I)}{dt}\cdot dt; \quad (4)$$

$$Q = -\frac{1}{\omega T}\int_0^T I(t)\cdot\frac{dU(I)}{dt}\cdot dt, \qquad (5)$$

где ω - угловая частота изменения величин, входящих в выражение для мгновенной мощности.

Введение производной под знак интеграла позволяет сдвинуть то-ли сигнал напряжения, то-ли тока на $\pi/2$, что характерно для преобразования Гилберта. Частота в знаменателе перед знаком интеграла позволяет избавиться от дополнительного сомножителя при дифференцировании. В этом видится искусственность приема при определении параметра Q.

Получаемые результаты достаточно наглядны при анализе гармонических сигналов. При наличии гармонических в сигнале определение реактивной мощности необходимо производить для каждой гармоники независимо от других. Для анализа представим одни из сигналов в такой форме:

$$I(t) = I_1 \sin\omega_1 t + I_2 \sin\omega_2 t + ... + I_m \sin\omega_m t \ , \qquad (6)$$

где $I_1 ... I_m$ - амплитудные значения составляющих тока.

Производная тока будет:

$$\frac{dI(t)}{dt} = I_1\omega_1 \cos\omega_1 t + I_2\omega_2 \cos\omega_2 t + ... + I_m\omega_m \cos\omega_n t \ ,$$

следовательно, значения реактивной мощности гармоник будут определятся зависимостями:

$$Q_1 = \frac{1}{\omega_1 T}\int_0^T \omega_1 I_1 \cos\omega_1 t \cdot U_1 \cos\omega_1 t \cdot dt = \frac{1}{2}U_1 I_1;$$

$$Q_2 = \frac{1}{\omega_2 T}\int_0^T \omega_2 I_2 \cos\omega_2 t \cdot U_2 \cos\omega_2 t \cdot dt = \frac{1}{2}U_2 I_2;$$

$$Q_m = \frac{1}{\omega_m T}\int_0^T \omega_m I_m \cos\omega_m t \cdot U_m \cos\omega_m t \cdot dt = \frac{1}{2}U_m I_m; \qquad (7)$$

$$Q_\Sigma = \sum_{m=1}^{m} Q_m = Q_1 + Q_2 + ... + Q_m \ .$$

Следует отметить, что активная мощность, определяемая из мгновенной (3), получается как сумма составляющих. Естественно, что ее значение может быть также получено и для каждой гармоники в отдельности, если предварительно определен гармонический состав напряжения и тока и углы сдвига между гармониками.

Независимо от подхода, каким достигается результат, его математическая форма будет:

$$P_\Sigma = \sum_{n=1}^{n} P_n \ ;$$

$$Q_\Sigma = \sum_{n=1}^{n} Q_n \ . \qquad (8)$$

Эти выражения будут еще интерпретироваться в контексте с зависимостями для полной мощности полигармонических сигналов. Использование этого понятия обязательно, так как баланс мощности может быть получен только в том случае, когда будет введена некоторая дополнительная составляющая, за которой можно оставить возможную неконкретность метода оценивания энергетических характеристик.

Организация искусственных приемов, введение свободной, заранее не определяемой составляющей (мощности искажения) - суть некорректности принятия в качестве базовой величины полной мощности, а также методов определения

энергетических показателей, базирующихся на этом принятии.

Важно также то, что при определении полной мощности по знакопеременным составляющим игнорируется первая компонента в (2), т.е. P_0, а во втором – при определении реактивной мощности с использованием преобразования Гилберта игнорируется вторая компонента в упомянутом выражении.

Это говорит о произвольности выбора оценок энергетических режимов. Естественно, что получаемые при этом результаты не отражают всего комплекса энергетических процессов. Сказанное в равной мере относится как к гармоническим сигналам так и к полигармоническим. Следует отметить, что при полигармонических сигналах противоречия оказываются еще более существенными. Для убедительности выполним следующее обоснование.

Анализ показывает, что ни одно из выражений (среднее, среднеквадратичное, среднее значение модуля) не дает меры для *P(t)* в форме $S = U \cdot I$, что подтверждает высказанные авторами [8,10] утверждения о недостаточной обоснованности применения понятия полной или кажущейся мощности для анализа энергетических режимов в электрической сети. Для подтверждения сказанного рассмотрим формирование составляющих мощности при наличии гармонических в кривых напряжения и тока [1,3]:

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U^2(t) d\vartheta} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + ... + U_n^2}\ ; \tag{9}$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I^2(t) d\vartheta} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + ... + I_m^2}\ , \tag{10}$$

где $U_1,...,U_n$ – действующие значения гармоники напряжения.

Кажущаяся мощность при этом

$$\begin{aligned} S &= U_э \cdot I_э = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + ... + U_n^2} \times \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + ... + I_m^2} = \\ &= \sqrt{\sum_{k=2}^{k=m\cdot n} U_n^2 \cdot I_m^2 + \sum_{k=1(m\neq n)}^{k=m\cdot n(m\neq n)} U_n^2 \cdot I_m^2}\ . \end{aligned} \tag{11}$$

Первая составляющая подкоренного выражения представляет собой произведение квадратов эффективных значений напряжения и тока одинаковых частот, вторая – произведение соответствующих разночастотных компонент. Последняя составляющая представляет собой сумму компонент мощности искажения [1,2,3].

Выполним анализ первой составляющей с учетом существующих представлений об энергопроцессах:

$$\begin{aligned} &\sum_{m=n=1}^{k=m=n} U_n^2 \cdot I_m^2 = U_1^2 \cdot I_1^2 + U_2^2 \cdot I_2^2 + ... + U_n^2 \cdot I_m^2 = P_1^2 + Q_1^2 + P_2^2 + Q_2^2 + ... + P_n^2 + Q_n^2 = \\ &= \sum_{k=m=n=1}^{k=m=n} \left(P_1^2 + P_2^2 + ...P_n^2\right) + \sum_{k=m=n=1}^{k=m=n} \left(Q_1^2 + Q_2^2 + ...Q_n^2\right). \end{aligned} \tag{12}$$

Следовательно, полная мощность полигармонических сигналов:

$$S = \sqrt{\sum_{k=1}^{k=m=n} P_n^2 + \sum_{k=1}^{k=m=n} Q_n^2 + T_n^2}\ , \tag{13}$$

где $T_n^2 = \sum_{m\neq n;k=1}^{k=m\times n} U_n^2 \cdot I_m^2$ - квадрат мощности искажения.

Из зависимостей (12) и (13) следует, что квадрат полной мощности включает сумму квадратов составляющих активной и реактивной мощности, равных соответственно

$$P_n = U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n ;\ Q_n = U_n \cdot I_n \cdot \sin\varphi_n . \qquad (14)$$

Известно, что активная мощность сигналов, содержащих гармоники напряжения и тока равна $P_\Sigma = P_1 + P_2 + ... + P_n$, что для принятых нами обозначений означает:

$$P_\Sigma = \sum_{k=1}^{k=m=n} P_n ,\ \ P_\Sigma^2 = \left(\sum_{k=1}^{k=m=n} P_n \right)^2 . \qquad (15)$$

Отсюда следует важный вывод: если учесть, что (15) соответствует закону сохранения, то из (12) вытекает неравенство:

$$\sum_{k=1}^{k=m=n} P_n^2 \neq \left(\sum_{k=1}^{k=m=n} P_n \right)^2 . \qquad (16)$$

Это означает, что математическая интерпретация полной мощности S в форме (11) и (13) не соответствует закону сохранения и использование подобного подхода при оценке энергетических процессов ошибочно. Таким образом, полная или кажущаяся мощность не является адекватной оценкой, т.е. мерой процессов, описываемых произведением мгновенных значений напряжения и тока.

Ряд авторов отмечают, что суммарная реактивная мощность равна сумме реактивных мощностей отдельных гармоник по аналогии с соответствующим равенством для активной мощности. Здесь подчеркиваем то, что сказанное относится к мощности гармонических, но не к мощности полигармонического сигнала.

Очевидно, что следует эти понятия однозначно различать и разделять. Отсутствие такого подхода привело в конечном итоге к введению понятия мощности искажения, которая в элементарной интерпретации представляется произведением разночастотных компонент $T_n = U_m \cdot I_n$, когда $m \neq n$. Помня, что U_m и I_n - некоторые гармонические функции, уместно задать вопрос почему T_n рассматривается не как сумма элементарных составляющих с частотами $m+n$ и $m-n$. Видимо, термин «мощность искажения» является условием стабильности понимания энергопроцессов, но не представлением, дающим четкую трактовку.

Другими словами, мощность искажения которая состоит так же из квадратурных составляющих вполне определимых частот, должна на полном основании входить в общие уравнения энергобаланса. Этим, естественно, снимается вопрос о непотребности введения в оценки энергетических процессов понятия полной или эффективной мощности. Другой вывод, вытекающий из анализа заключается в том, что следует отдельно говорить о мощности гармоник, а также о мощности процесса, в котором участвуют как одноименные гармоники, так и их взаимно обусловленные составляющие.

Объективной оценкой мгновенной мощности (ее мерой) является эффективная мощность или ее среднеквадратичное значение. В соответствии с (2) получим [10]:

$$\begin{aligned} P_э &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U^2(t) \cdot I^2(t) d\vartheta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} P^2(t) d\vartheta} = \\ &= U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} (\cos\varphi + \cos 2\Omega t \cdot \cos\varphi + \sin 2\Omega t \cdot \sin\varphi) d\vartheta} = \\ &= U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \cos^2\varphi + \frac{1}{2} \cdot \sin^2\varphi} = U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \cos^2\varphi} . \end{aligned} \qquad (17)$$

Из последней зависимости видно, что эффективная мощность учитывает как постоянную, так и переменную составляющие мгновенной мощности, что, естественно, более информативная оценка, чем та, которая получается из (1).

На практике зависимости тока и напряжения, как правило, содержат гармоники,

порядок которых может совпадать; возможны и такие режимы, при которых частоты некоторых гармонических в токе и напряжении могут отличаться. Для получения конкретных результатов, определяющих особенности преобразования мощности полигармонических сигналов запишем общие выражения для тока и напряжения таким образом [8,9]:

$$I(t)=\sum_{m=0}^{m=k_i} I_m \cdot \cos(\Omega_m t+\varphi_m);$$
$$U(t)=\sum_{n=0}^{n=k_u} U_n \cdot \cos(\Omega_n t+\varphi_n). \qquad (18)$$

После несложных преобразований получим:

$$I(t)=\sum_{m=m_a=0}^{m=k_i} I_{ma}\cdot\cos\Omega_{ma}t-\sum_{m=m_b=0}^{m=k_i} I_{mb}\cdot\sin\Omega_{mb}t;$$
$$U(t)=\sum_{n=n_a=0}^{n=k_u} U_{na}\cdot\cos\Omega_{na}t-\sum_{n=n_b=0}^{n=k_u} U_{nb}\cdot\sin\Omega_{nb}t,$$

где $I_{ma}=I_m\cdot\cos\varphi_m$; $I_{mb}=I_m\cdot\sin\varphi_m$; $U_{na}=U_n\cdot\cos\varphi_n$; $U_{nb}=U_n\cdot\sin\varphi_n$.

Общее выражение для мгновенной мощности при этом будет иметь вид:

$$\begin{aligned} P(t)=U(t)\cdot I(t)=&\sum_{m=m_a=0}^{m=k_i} I_{ma}\cdot\cos\Omega_{ma}t\times\sum_{n=n_a=0}^{n=k_u} U_{na}\cdot\cos\Omega_{na}t+\\ +&\sum_{m=m_b=0}^{m=k_i} I_{mb}\cdot\sin\Omega_{mb}t\times\sum_{n=n_b=0}^{n=k_u} U_{nb}\cdot\sin\Omega_{nb}t-\sum_{m=m_b=0}^{m=k_i} I_{mb}\cdot\sin\Omega_{mb}t\times\sum_{n=n_a=0}^{n=k_u} U_{na}\cdot\cos\Omega_{na}t-\\ -&\sum_{m=m_a=0}^{m=k_i} I_{ma}\cdot\cos\Omega_{ma}t\times\sum_{n=n_b=0}^{n=k_u} U_{nb}\cdot\sin\Omega_{nb}t=\sum_{k=m-n=0}^{k=m-n} P_{k0}+\sum_{k=m-n\ge1}^{k=m+n} P_{ka}(t)+\sum_{k=m-n\ge1}^{k=m+n} P_{kb}(t), \end{aligned} \qquad (19)$$

где P_{k0}, P_{ka}, P_{kb} – постоянная составляющая активной мощности и амплитуды переменных составляющих мгновенной мощности (косинусная и синусная составляющие).

При этом очевидны следующие закономерности [10]:

– постоянная составляющая активной мощности получается только при умножении компонент тока и напряжения с одинаковыми частотами (разность частот $\Omega_m-\Omega_n=0$ при $m=n$). Если $m_i=n_u$, то число составляющих, из которых формируется P_{k0}, будет равно m_i;

– косинусные составляющие мгновенной мощности k-й частоты получаются в результате умножения: косинусных составляющих напряжения и тока, когда выполняется одно из условий $m+n=k$, $m-n=k$, синусных составляющих напряжения и тока при соблюдении тех же условий;

– синусные составляющие мгновенной мощности k-й частоты получаются при умножении косинусной составляющей напряжения на синусную составляющую тока (синусной составляющей напряжения на косинусную составляющую тока) при выполнении условий $m+n=k$, $m-n=k$.

Так как постоянные составляющие P_{k0} суммируются арифметически, и переменные P_{ka} и P_{kb} представляют собой гармонические функции, то эффективное значение мощности с учетом (17) будет иметь вид:

$$P_э=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\cdot\int_0^{2\pi}P^2(t)d\vartheta}=\sqrt{\left(\sum_{k=0(m=n)}^{k(m=n)}P_{k0}\right)^2+\frac{1}{2}\cdot\sum_{k=m-n}^{k=m+n}P_{ka}^2+\frac{1}{2}\cdot\sum_{k=m-n}^{k=m+n}P_{kb}^2}. \qquad (20)$$

Входящие в (20) составляющие определяются из выражения мгновенной

мощности:

$$\sum_{k=0}^{k(m=n)} P_{k0} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U(t) \cdot I(t) d\vartheta ; \tag{21}$$

$$P_{ka} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U(t) \cdot I(t) \cdot \cos(k\Omega t) d\vartheta ; \tag{22}$$

$$P_{kb} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U(t) \cdot I(t) \cdot \sin(k\Omega t) d\vartheta . \tag{23}$$

Таким образом, составляющие мгновенной мощности определяются с использование интегрального метода - как постоянная составляющая ее, так и ансамбль квадратурных компонент. В простейшем случае $(k = 2)$, это соответствует выражению (2) получаются все три составляющие не прибегая к преобразованию Гильберта. Противоречия таким образом, исчезают, если учитывать то, что k - индекс конкретной гармоники мощности.

Из выполненного анализа следует важный вывод о том, что составляющие мощности конкретно взятой гармоники $k = (n \pm m)$ не равны составляющим мгновенной мощности, если $k = 2n = 2m$. Это объясняется тем, что мощность искажения вошла в качестве составляющих в результирующие значения переменных составляющих мощности сети. Спектр частот мгновенной мощности по указанной причине оказывается существенно шире, чем спектр гармоник тока или напряжения.

Качественные и количественные оценки процесса преобразования энергии осуществляются с использованием системы показателей, оценивающих разные стороны упомянутого процесса [1]. Количество показателей устанавливается исходя из теоретических и практических потребностей, удобства и наглядности их использования. Комплекс показателей энергетического режима включает: коэффициенты искажения напряжения питания и тока, коэффициент использования активной мощности и коэффициент реактивности, определяющий отношение реактивной мощности к активной. Очевидно, что коррекции или новой оценки заслуживают коэффициент использования активной мощности и коэффициент реактивности, в то время как коэффициенты искажения напряжения и тока остаются неизменными будучи свободными, не связанными с полной мощностью, и способами определения ее составляющих. Говоря о потребностях практического порядка, следует отметить, что в зависимости от особенностей математического описания процесса, имеются и разные возможности оценки его качественных и количественных характеристик.

В частности, при решении важного вопроса компенсации синусной мощности (P_{k_b}), следует иметь в виду, что изменение хотя бы одной из гармоник приводит к соответствующему изменению переменных составляющих мощности по всему ансамблю гармонических мгновенной мощности.

В соответствии с существующими показателями коэффициент мощности энергопроцесса:

$$K_м = \frac{\sqrt{\left(\sum_{k=0}^{k(m=n)} P_{k0}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{ka}^2}}{\sqrt{\left(\sum_{k=0}^{k(m=n)} P_{k0}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{ka}^2 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{kb}^2}} . \tag{24}$$

Как следует из последнего выражения, при $P_{kb}=0$ коэффициент мощности равен единице и снижается до нуля при $P_{k0\Sigma}=0$, причем зависимость $K_м$ существенно

отличается от соответствующей величины, получаемой при использовании существующей методики.

Коэффициент реактивности:

$$K_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}\cdot\sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{kb}^2}}{\sqrt{\left(\sum_{k=0}^{k(m=n)} P_{k0}\right)^2 + \frac{1}{2}\cdot\sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{ka}^2}}.$$

Амплитуда переменной составляющей мощности:

$$P_k = \sqrt{P_{ka}^2 + P_{kb}^2}\ ; \qquad (25)$$

$$P_{ka} = \frac{1}{2\pi}\cdot\int_0^{2\pi} P(t)\cdot\cos k\Omega t d\vartheta\ ;$$

$$P_{kb} = \frac{1}{2\pi}\cdot\int_0^{2\pi} P(t)\cdot\sin k\Omega t d\vartheta\ .$$

Действующее значение переменной составляющей мощности:

$$P_{k\Sigma} = \frac{1}{2}\cdot\sqrt{\sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{ka}^2 + \sum_{k=m-n}^{k=m+n} P_{kb}^2} = \frac{1}{2}\cdot\sqrt{P_э^2 - \left(\sum_{k=0}^{k=m(m=n)} P_0\right)^2}\ . \qquad (26)$$

Определение показателей энергопроцессов в трехфазной сети осуществляется с учетом полученных ранее результатов. При этом нужно учитывать временной сдвиг между соответствующими составляющими мощности отдельно взятых фаз. Здесь ограничимся лишь указаниями, касающимися определения переменных мгновенных и эффективных составляющих мощности трехфазной нагрузки:

– активная мощность трехфазной нагрузки определяется алгебраической суммой активных мощностей всех фаз: $P_{0\Sigma} = P_{0_A} + P_{0_B} + P_{0_C}$;

– результирующая переменная активная мощность трехфазной нагрузки равна геометрической сумме переменных косинусных составляющих отдельных фаз: $\overline{P_{ak\Sigma}} = \overline{P_{ak_A}} + \overline{P_{ak_B}} + \overline{P_{ak_C}}$;

– результирующая переменная синусная мощность трехфазной нагрузки равна геометрической сумме синусных составляющих отдельных фаз: $\overline{P_{bk\Sigma}} = \overline{P_{bk_A}} + \overline{P_{bk_B}} + \overline{P_{bk_C}}$;

– квадрат переменной составляющей мощности трехфазной нагрузки равен сумме квадратов результирующих значений переменных косинусной и синусной составляющих мощности трехфазной нагрузки: $P_{k\Sigma} = \sqrt{P_{ak\Sigma}^2 + P_{bk\Sigma}^2}$;

– эффективное значение k-й переменной составляющей мощности трехфазной нагрузки равно алгебраической сумме эффективных значений переменных составляющих мощности отдельных фаз: $P_{k\Sigma} = P_{k\Sigma_A} + P_{k\Sigma_B} + P_{k\Sigma_C}$;

– результирующее эффективное значение переменной активной мощности трехфазной нагрузки равно алгебраической сумме эффективных значений переменной активной мощности отдельных фаз:
$P_{ak\Sigma} = P_{ak_A} + P_{ak_B} + P_{ak_C}$;

– эффективное значение синусной мощности трехфазной нагрузки равно алгебраической сумме эффективных значений синусной мощности отдельных фаз:
$P_{bk\Sigma} = P_{bk_A} + P_{bk_B} + P_{bk_C}$;

– эффективное значение мощности трехфазной нагрузки равно алгебраической сумме эффективных мощностей всех фаз: $P_{э\Sigma} = P_{э_A} + P_{э_B} + P_{э_C}$.

Выводы

Методы оценки эффективности энергопроцессов, базирующиеся на использовании существующих представлений, нуждаются в уточнении ввиду несоблюдения закона сохранения при анализе с использованием понятия кажущейся или полной мощности.

Анализ энергопроцессов с использованием мгновенной мощности позволяет выполнить их оценивание с соблюдением закона сохранения, как для постоянной, так и для знакопеременных составляющих; причем в балансе мощность искажения не присутствует в виду того, что при частотных преобразованиях диссипатирует и входит в качестве компонент в канонические и производные гармоники мгновенной мощности.

Знакопеременные составляющие мгновенной мощности, являясь важным показателем качества энергетических режимов, определяются с использованием интегральных методов для косинусных и синусных компонент соответствующей частоты.

Косинусная составляющая мгновенной мощности является сопутствующей при передаче энергии переменным током, в силу чего она должна учитываться при определении традиционных показателей энергетического режима. Полученные выражения дают результат, отличающийся от традиционного в силу того, что разработанный метод оценки базируется на законе сохранения для переменных составляющих мгновенной мощности.

Развитие выполненного подхода на трехфазные цепи с полигармоническими напряжениями и токами позволит наряду с оценкой энергетического режима выполнить анализ качества преобразования энергии приемниками.

Список литературы

1. Зиновьев Г. С. Определение результирующих энергетических показателей вентильных преобразователей, Силовые вентильные преобразователи, Новосибирск, НЭТИ, 1984, с.89-100.
2. Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П. и др. Баланс энергий в силовых цепях, Киев, «Наукова думка», 1992, с.312.
3. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей, М., Энергия ,1975, с.320.
4. Замараев Б. С. Обобщенные энергетические показатели потребителей энергии, Сборник трудов ВЗПИ, вып.84,1973, с.168-175.
5. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях. М.: Энергия, 1975, с.127.
6. Akira Nabai, Toshihko Tanaka. A New Definition of Instaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instaneous Spase Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, No 3, 1996, p.1238-1244.
7. Gzarnecki L. Comments on Active Power Flow and Energy Accounts In Electrical Systems With Nonsinusoidal Waveforms and Assymetry. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, No 3, 1996, p.1244-1250.
8. Родькин Д.И. Новая система показателей качества электрической энергии. Науковий вісник НГУ, Дніпропетровськ, № 3, 2004, с. 20-26.
9. Супрунович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок. М., Энергоатомиздат, 1985, 136 с.
10. Родькин Д. И., Кожушок Г. Н. Особенности использования метода энергодиагностики. Вестник Харьковского политехнического университета. Проблемы автоматизированного электропривода, Харьков, т.2, 2002, с. 526-531.

УДК 621.314.632

Ю.Г. Осадчук, доц., канд. техн. наук, А.П. Сінолиций, проф., д-р техн. наук, Д.О. Кальмус
Криворізький технічний університет

Ресурсоенергозберігаючі аспекти електромеханічних систем і обладнання енергоємних установок

У статті описано основні напрями підвищення енергетичної ефективності і експлуатаційних характеристик систем живлення і керування енергоємними установками – турбомеханізмами на основі прогнозованої оцінки ресурсу працездатності електромеханічного обладнання та активного впливу на якість енергообмінних процесів. Встановлена послідовність операцій, які визначають гарантований ресурс використання обладнання за певних умов його експлуатації, а також визначені ефективні структури дволанкових перетворювачів енергії систем керування установками.
ресурсоенергозбереження, турбомеханізми, регульований електропривод, раціональна схема живлення, ресурс працездатності двигунів

Проблема ресурсо- і енергозбереження енергоємних технологій потужних виробництв в першу чергу нерозривно пов’язана з кількісними характеристиками споживання електроенергії безпосередньо технологічними об'єктами, з одного боку, та якістю перетворювання її параметрів в системах живлення і управління, з іншої. Специфічні вимоги формування енергобалансу з підвищеними рівнями всіх складових потужності (активної, реактивної, скривлення) обумовлені:

– неефективним регулюванням потужності турбомеханізмів (до 95% насосних, компресорних, вентиляційних та інших установок цього класу мають нерегульований електропривод);
– відсутністю ефективних по технічній реалізації методів та засобів компенсації неактивних складових потужності, а також пристроїв і систем оперативного контролю енергоспоживання безпосередньо в вузлах живлення і управління об'єктами.

Другою характерною особливістю експлуатації всього парка електрообладнання є підвищений рівень напруги на шинах підстанцій, а також відсутність пускорегулюючої апаратури для великої групи установок, обладнаних синхронними (СД) і асинхронними (АД) двигунами.

Останні роки розвитку економіки України характеризуються створенням ресурсоенергозберігаючих технологій в усіх галузях промисловості. З точки зору підвищення енергетичної ефективності енергоємних установок пріоритетним і перспективним є поступовий перехід від нерегульованих систем електроприводу до регульованих – більш ефективним за багатьма показниками [1]. При вагомих економічних показниках, які досягаються використанням регульованого електроприводу змінного струму для цілого ряду установок (насосів, компресорів, вентиляторів), особисто регулюючі і перетворювальні пристрої в традиційному їх виконанні мають низькі енергетичні показники. Це обумовлено тим, що по відношенню до мережі живлення дволанкові перетворювачі (з проміжною ланкою постійного струму) умовно представлені звичайними одно- і двомостовими випрямлячами з їх відомими регулювальними й експлуатаційними характеристиками. Для покращення показників (в першу чергу енергетичних) авторами здійснене обґрунтування раціональних варіантів схеми живлення і керування продуктивністю турбомеханізмів [1,2]. У цьому випадку формування енергобалансу системи “мере-

© Ю.Г. Осадчук, А.П. Сінолиций, Д.О. Кальмус. 2004

жа – перетворювач – двигун – механізм" характеризується складовими втрат усіх ланок, а загальний вираз потужності першої гармоніки в першому наближенні буде:

$$P_{(1)} = \frac{P_н \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_н}\right)^3}{\eta_2 \cdot \eta_н} \cdot \left(1 + \frac{\rho_{1\min}}{K_{1м}^2}\right), \qquad (1)$$

де ω, $\omega_н$ – відповідно поточне і номінальне значення швидкості турбомеханіма;

$P_н$ – номінальне значення потужності турбомеханізма;

$\rho_{1\min}$ – відносні втрати первинної ланки при оптимальному електроспоживанні (при відсутності неактивних складових потужності);

$K_{1м}$ – коефіцієнт потужності первинної ланки;

η_2, $\eta_н$ – відповідно коефіцієнти корисної дії вторинної ланки і вузла навантаження.

Розрахунки показали, що співмножник $\left(1 + \frac{\rho_{1\min}}{K_{1м}^2}\right) \cdot (\eta_2 \cdot \eta_н)^{-1}$ при максимальному навантаженні турбомеханізмів різних типів знаходиться в межах 1,25–1,35 і збільшується при зниженні швидкості до 50% від номінальної на 10–15%. Це враховано при складанні рівнянь для розрахунків залежності складових потужності від швидкості турбомеханізма.

В роботі [2] наведено залежності реактивної потужності від швидкості при симетричному та несиметричному способах керування та їх основні технічні показники. Обґрунтовані також схемо-технічні рішення систем живлення і керування одно– і дводвигунними електроприводами. Основна увага приділена рівню складових потужності і гармонік струму відповідного порядку. Найбільш ефективним варіантом для групового електроприводу є двомостові схеми з комбінованою комутацією, коли реактивна потужність може дорівнювати нулю, а рівень гармонік струму мінімальний.

Наступним аспектом ресурсозбереження є дослідження і визначення ресурсу працездатності електромеханічного обладнання. Рішення задачі визначення ресурсу працездатності, власне кажучи, відноситься до рішення задачі прогнозування, що, як відомо, відноситься до класу найбільш складних у тих випадках, коли це відноситься до систем, а не окремих елементів. Електрична машина, як показано в [3,4], є складною електромеханічною системою з чотирма контурами перетворення енергії:

– електростатичної взаємодії між електроізоляційними матеріалами. Це взаємодія в сполученні з іншими впливами (вологість, температура, фізико-хімічні) приведуть до зносу і виходу з ладу ізоляції;

– перетворення електричної енергії в теплову, яке викликає негативний вплив на електроізоляційні матеріали і знижує техніко-економічні показники;

– взаємодії магнітних полів статичних і обертових частин, що приводить до періодичного перемагнічування електротехнічної сталі й істотному тепловиділенню безпосередньо в місцях розташування обмоток. Втрати в сталі поряд із втратами в міді є найважливішими факторами, які визначають працездатність ізоляції;

– механічного перетворення енергії, що приводить до зносу обертових частин, вібраційному зношенню ізоляційних матеріалів.

Очевидно, що формалізація вище перерахованих факторів з урахуванням їхнього взаємного впливу є матеріалом, на підставі якого можуть будуватися моделі прогнозування залишкового ресурсу надійної роботи. Рішення цієї задачі пропонувалося виконати на рівні конструювання електричних машин [5]. Дійсна картина розрахункової надійності спотворювалася насамперед з вини виробника, який закладав у конструкцію

матеріали з відхиленнями характеристик від нормативних показників. Це диктувалося виробничими зв'язками і відносинами між постачальниками, що існували в доперебудовний і перебудовний період. Ринкові механізми тільки в даний час по справжньому починають формуватися, хоча якість комплектуючих матеріалів як і раніше не завжди відповідає необхідним показникам.

Відзначимо найбільш важливі задачі, які необхідно вирішити для того, щоб коректно вирішити питання оцінки працездатності з урахуванням наявного зносу обладнання. Так як оцінювання ресурсу працездатності представляється періодичною процедурою, що здійснюється персоналом у ході експлуатації, профілактичних оглядів, при середньому ремонті, то необхідне визначення в обов'язковому порядку фізико-хімічних властивостей ізоляції електричної машини.

Одержувані при цьому моделі повинні будуватися для можливих варіантів:

– стан ізоляції при повній її заміні в період ремонту;
– стан ізоляції при частковій заміні частини обмоток і ізоляційного матеріалу, що вийшли з ладу.

Визначення ресурсу працездатності може здійснюватися в ході післяремонтних випробувань, які зручно розглядати в такий спосіб. Під післяремонтними випробуваннями будемо розуміти дослідження готової електричної машини, у той час як випробування окремих елементів – як пооопераційні випробування при ремонті. Тоді узагальнений алгоритм визначення ресурсу електричної машини матиме вид показаний на рисунку 1.

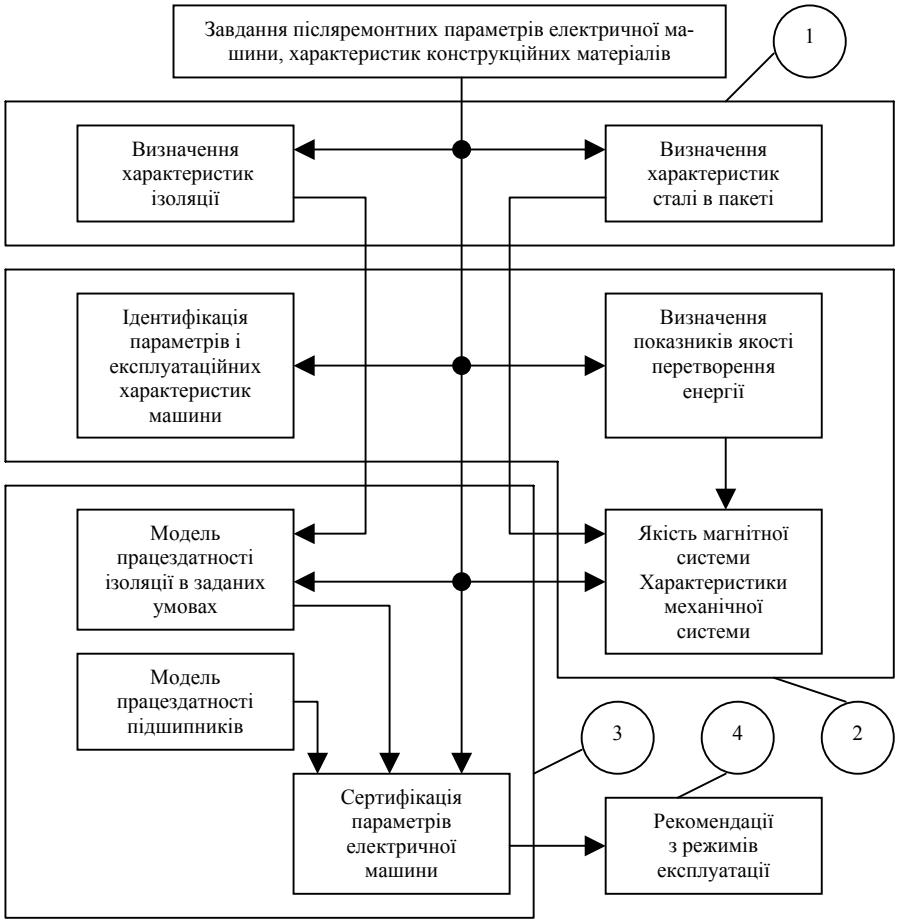


Рисунок 1 – Структура операцій визначення ресурсу в ході ремонту

Операції по визначенню ресурсу складаються з трьох блоків: доремонтних операцій – 1, випробування виробу, який вийшов з ремонту – 2, визначення ресурсу електричних машин за результатами операцій 1 і 2 для сталого режиму і видача сертифіката – 3. Варто відмітити, що обсяг випробувань після ремонту повинен законодавче бути затверджений після

належного аналізу і перегляду. При цьому обов'язкове введення операцій визначення якості електротехнічної сталі, якості магнітної системи і, в остаточному підсумку, якості перетворення енергії. Окрема позиція – 4 відповідає тим рекомендаціям для експлуатації, виконання яких обов'язково. Це стосується питань побудови захистів двигунів, що враховують якість перетворення енергії, режими роботи в умовах конкретних технологічних процесів.

Здійснення операції ідентифікації параметрів двигунів і реалізація кінцевої мети може бути здійснена в ході експлуатаційного моніторингу електричних машин (рисунок 2). Здійснення вимірювальних операцій повинне виконуватися при запуску технологічного агрегату, а наступна математична обробка здійснюватися як для процесу пуску, так і сталого руху [6].

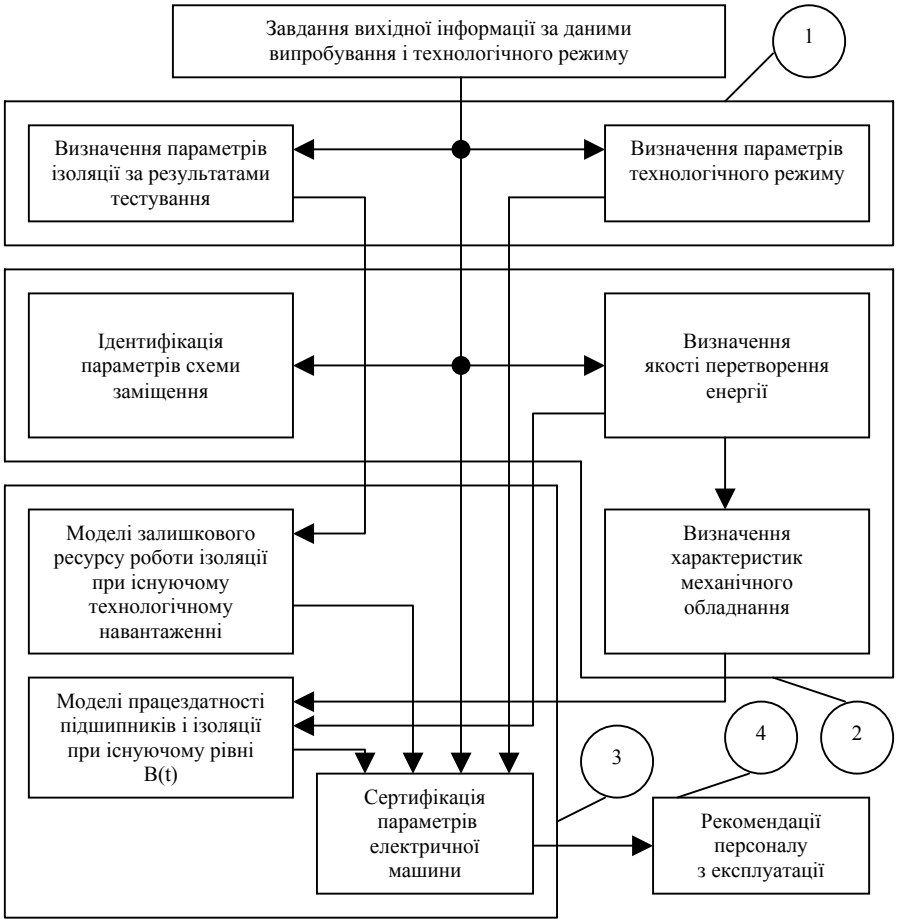


Рисунок 2 – Структура операцій визначення залишкового ресурсу при моніторингу

Відсутність сучасного якісного випробувального обладнання виправдувалося аргументами про незмінність параметрів і характеристик електричних машин до і після ремонту. Це, природно, виправдувало мінімальний обсяг випробувальних операцій при здавальних випробуваннях готового обладнання. Помилковість такого твердження в тому, що проміжки між повторними ремонтами поступово зменшуються від одного ремонтного циклу до іншого.

Відсутність теорії основних процесів, що визначають якість кінцевого продукту, стала основною причиною, через яку в даний час відсутня можливість визначення фактичного ресурсу працездатності на стадії поточної експлуатації чи при введенні в експлуатацію відремонтованого агрегату. Умови, при яких можна реалізувати наявні теоретичні положення – достовірне знання характеристик основних елементів, що входять у конструкцію машини:

– електромагнітної системи;
– механічної частини;
– системи охолодження і т.п.

Знання характеристик електромагнітних режимів визначає можливі очікувані параметри характеристик на виході – пускові, струмові, механічні та ін. Знання характеристик механічних режимів визначає важливі вихідні параметри – рівень вібрації, шум і в остаточному результаті – можливий термін служби.

Ефективний тепловідвід – важлива складова працездатності електричних машин. Характерно, що для машин масового виробництва системи вентиляції є визначеним конструктивним параметром, одноразово заданим заводом виготовлювачем. Можливі впливи на систему, як правило, приводить до погіршення її характеристик, зниженню ефективності. Керованість системи охолодження така ж важлива проблема як і проблема регулювання швидкості обертання електричної машини.

Важливо те, що реальна взаємодія зазначених факторів, що визначають працездатність підшипників, ізоляції й ін. повною мірою не вивчена і є тим елементом, вивчивши і вирішивши який з'явиться можливість вирішити центральну задачу визначення ресурсу для конкретних технологічних умов.

Наявність таких систем для машин, які були у ремонті, та знаходяться в стадії доробки ресурсу, що залишився, дозволить істотно впливати на працездатність електрообладнання об'єкта в цілому.

Варто зазначити, що визначення залишкового ресурсу може бути виконано тільки в ході спеціальних наукових і інженерних заходів, у ході яких виконуються регламентовані дослідження. Один з таких заходів – ремонт електричної машини, у ході якого здійснюється заміна зношених конструкційних елементів, визначений, регламентований документами обсяг випробувань. Метою випробувань є визначення функціональної придатності виробу з визначеними технічними характеристиками.

Реконструкція, на відміну від ремонту припускає виконання таких інженерних заходів, що дозволяють одержати розширення функціональних можливостей, поліпшення технічних характеристик. Реконструкція здійснюється при використанні нових, якісних матеріалів, що забезпечують вищу енергонапруженість і, як наслідок, – кращі характеристики.

Економічна сторона проблеми очевидна і полягає в тому, що здійснюється значна економія засобів на заміну формально зношеного обладнання за рахунок продовження науково обґрунтованого терміну експлуатації.

Варто підкреслити ту обставину, що реальна характеристика електричної машини може бути отримана тільки з використанням науково обґрунтованих прийомів, з використанням високопродуктивного діагностичного обладнання, що дозволяє реалізувати свої функції без використання складних випробувальних станцій. Виконання зазначених операцій повинні бути під силу спеціалізованим сертифікаційним лабораторіям, що входить як у структуру електроремонтних підприємств, І так і великих промисловим підприємствам. Роль останніх - здійснення вхідного контролю якості електромеханічного обладнання, що надходить на виробництво.

Список літератури

1. Алпатов О.В., Осадчук Ю.Г. Аналіз реальних параметрів потужних двигунів змінного струму гірничо-металургійного комплексу. // Проблемы создания новых машин и технологий. Научн. труды Кременчугского государственного политехнического университета. – Вып.2/2000(9). – Кременчуг: КГПУ, 2000. – С. 133-137.
2. Синолицый А.Ф., Осадчук Ю.Г., Кольсун В.А. Повышение энергетической эффективности систем группового питания и управления турбомеханизмами. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003. – №2 т.1. – С. 120 –125.
3. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов по спец. «Электрич. машины". – М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.
4. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических -машин. Л: Энергоатомиздат. 1984. – 408 с.
5. Ермолин И.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. Л: Энергия. 1976. – 248с.
6. Комплексы для экспресс-диагностики двигателей переменного тока. Родькин Д.И., Черный А.П., Калинов А.П., Барвинок Д.В., Хараджян А.А., Здор И.Е., Никитина А.В., Живора В.Ф., Величко Т.В. Сборник научных трудов НГУ. – Днепропетровск. НГУ, 2003, Т. 2, №17. – С. 110 – 121.

УДК 621.315

Б.Г. Набока, проф., д-р техн. наук, В.Я. Гладченко, проф., канд. техн. наук, А.В. Беспрозванных, доц., канд. техн. наук
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Оценка ресурса коаксиальных силовых проводов по потере массы ПВХ-пластикатов

Представлена методика определения ресурса проводов с изоляцией и оболочкой из ПВХ-пластикатов путем измерений потери массы.
силовой кабель, ПВХ изоляция

Введение

Электроснабжение в сетях напряжением 220/380 В все чаще осуществляется с применением силовых проводов (кабелей) марок АВК, АВВк, АВПвк, АПвВк, коаксиальная конструкция которых затрудняет несанкционированный доступ к электрической цепи. Близкое расположение прямого и обратного токопроводов приводит к напряженному тепловому режиму изоляции и оболочки. При плотности тока 2 А/мм^2 температура алюминиевой жилы достигает 70 ^{o}С, а в узле крепления провода - даже выше. Материалы изоляции и оболочки, выполненные из поливинилхлоридных (ПВХ) пластикатов, со временем теряют эластичность и могут растрескиваться. Основной причиной старения является улетучивание пластификаторов, обнаруживаемое по снижению массы. Другие процессы старения – второстепенны: деструкция самой ПВХ-смолы или обратный процесс - ее дополнительная сшивка; окисление; исчерпание стабилизаторов (солей свинца), в результате чего выделяющийся при старении ПВХ-пластикатов хлористый водород перестает связываться и начинает оказывать каталитическое влияние на разложение смолы. Химический состав применяемых пластикатов и технология изготовления не являются постоянными. В результате ресурс проводов может не достигать нормированной величины - не менее 10 лет по ТУ [1, 2].

Постановка проблемы

Определение ресурса изоляции обычно выполняется путем ускоренных ресурсных испытаний при повышенных температурах. Согласно закону Аррениуса ресурс τ экспоненциально убывает с ростом абсолютной температуры T изоляции:

$$\tau = A \cdot e^{\frac{W}{kT}} \qquad (1)$$

где W- энергия активации процесса старения, Дж;
k- постоянная Больцмана (1,38·10^{-23} Дж/К);
A - эмпирический коэффициент.

Обычно W = 0,8 – 1,4 эВ. Тогда уменьшение ресурса, например, в 2 раза происходит при увеличении температуры на $\Delta T_{1/2}$ градусов, причем:

а) в диапазоне рабочих температур (около 70 ^{o}С для ПВХ-пластикатов указанных проводов) - величина $\Delta T_{1/2}$ = 7 – 12 ^{o}С;

б) в диапазоне испытательных температур (около 120 ^{o}С) - величина $\Delta T_{1/2}$ = 5 – 9 ^{o}С. Проблема заключается в том, что энергия активации может меняться с ростом

© Б.Г. Набока, В.Я. Гладченко, А.В. Беспрозванных. 2004

температуры. Поэтому вводят ограничения на верхнюю испытательную температуру. Согласно публикации МЭК 216 [3] ее рекомендуется выбирать выше максимальной рабочей температуры не более, чем на 25 ^{o}C. В результате длительность ресурсных испытаний может достигать одного года.

Степень состаренности *материалов* кабелей - ПВХ-пластикатов - может оцениваться также методом *термогравиметрического анализа* (ТГА) [4]. При испытаниях температура образца материала линейно нарастает (со скоростью 10 ^{o}C/мин). Фиксируется температура $TG_{5\%}$, при которой масса образца уменьшается на 5% (из-за улетучивания низкомолекулярных фракций – пластификаторов, продуктов разложения ПВХ-смолы). Установлено, что параметр $TG_{5\%}$ уменьшается со временем старения τ, причем линейно:

$$TG_{5\%}=TG_{5\%}(0)\cdot(1-a\tau), \qquad (2)$$

где $TG_{5\%}(0)$ – значение параметра в начальный момент времени (в состоянии поставки кабеля);

a – коэффициент.

Обычно $TG_{5\%}(0) \geq 240$ ^{o}C, а критическим значением параметра, при котором ресурс пластиката можно считать исчерпанным, является $TG_{5\%}(\tau_k) = 200$ ^{o}C. Задачей ресурсных испытаний является нахождение значения коэффициента a для конкретного пластиката.

Если имеются образцы изоляции, находившиеся в эксплуатации, например, 2 года, то, определив для них параметр $TG_{5\%}$, по (2) находят искомый коэффициент a. Тогда ресурс изоляции τ_k найдется из уравнения:

$$TG_{5\%}(\tau_k)=TG_{5\%}(0)\cdot(1-a\tau_k). \qquad (3)$$

Использование методики ТГА для оценки ресурса требует длительной предварительной работы по формированию исходных данных либо наличия образцов с известной длительностью и температурой эксплуатации. Недостатком этой методики является также и то, что при исследовании материалов отдельно от кабеля не учитываются возможные эффекты взаимодействия компонентов изоляции и оболочки, специфика процессов десорбции пластификатора с поверхности изоляции жилы сквозь защитную оболочку и др.

Цель работы – оценка ресурса ПВХ-изоляции в *конструкции* силовых коаксиальных проводов (кабелей). Испытаниям подвергаются целиком - отрезки кабелей, по отдельности - материалы изоляции и оболочки.

Основные предпосылки

В условиях эксплуатации диффузионная десорбция пластификаторов приводит к снижению массы материалов изоляции и оболочки. Установлено [5], что масса m экспоненциально убывает со временем старения:

$$m=m_0\cdot exp(-k_p\tau^n), \qquad (4)$$

где k_p – кинетический коэффициент десорбции пластификатора;

τ – время старения;

m_0 – начальная масса;

n – коэффициент.

Кинетический коэффициент k_p растет с увеличением температуры [4]:

$$k_p=b\cdot exp(-\frac{W_p}{kT}), \qquad (5)$$

где b – коэффициент;

W_p – энергия активации процесса диффузии пластификатора.

Используя закономерности (4), (5), выполним прогноз ресурса образцов кабелей АВК. Для этого требуется выполнить наблюдения за кинетикой убыли массы в процессе теплового старения, проверить выполнение соотношений (4) и (5), определить их неизвестные коэффициенты.

Методика проведения испытаний

Отрезки кабелей АВК-6/6 и АВК 10/10 длиной по 5 см, а также образцы изоляции их жил и оболочек подвергались циклам выдержки в термостате при температурах 110 и 130 ^{o}C. Ежедневная наработка при повышенной температуре составляла от 5 до 10 час. Термостаты на ночь отключались, охлаждение производилось плавно, при закрытой двери термостата. Тем самым имитировались циклы тепловых воздействий на изоляцию. В ночное время из термостата полностью удалялись продукты разложения изоляции.

Периодически измерялась масса образцов материалов изоляции и оболочки, а также отрезков кабелей (вместе с материалами жил и внешнего проводника (экрана)). Убыль массы образцов кабелей относилась к первоначальной массе изоляционных материалов в них. Поэтому получали сопоставимые данные о скорости деструкции материалов по отдельности и в составе конструкции.

Результаты испытаний

На рис.1 представлены кривые теплового старения материалов кабелей. Они описываются экспоненциальной функцией (4), причем с коэффициентом n, близким к единице. Действительно, те же данные, представленные в масштабе $ln(ln(m_0/m))= f[ln(\tau)]$ (рис.2), изображаются прямыми, почти параллельными линиями с угловым коэффициентом около 1. Кривые рис.1 пронумерованы в порядке убыли скорости деструкции. Наибольшая она для материалов изоляции и оболочки кабелей, испытываемых по отдельности. Для материалов, находящихся в кабеле, скорость деструкции оказывается меньшей, по-видимому, из-за меньшей поверхности испарения летучих продуктов.

Критической величиной убыли массы ПВХ-пластикатов считается величина 20%. Она достигается спустя 350 час старения при 130 ^{o}C, и спустя 1750 час старения при 110 ^{o}C. Эти значения использовались в дальнейшем для оценки ресурса кабелей (см. ниже рис.3).

Энергия активации процессов старения W в (1) может быть разной при максимальной температуре эксплуатации (70 ^{o}C) и при максимальной температуре испытаний (130 ^{o}C). Для проверки этого положения выполнены измерения *сопротивления изоляции* R в диапазоне температур от комнатной до 140 ^{o}C. Оно должно экспоненциально убывать с ростом температуры:

$$R=A_R \cdot e^{\frac{W_R}{kT}}, \qquad (6)$$

где W_R - энергия термоактивации носителей зарядов в диэлектрике;

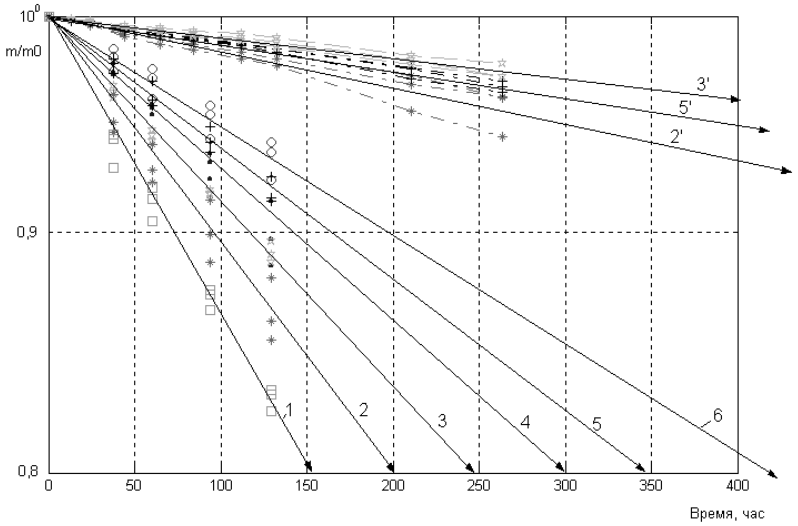
A_R – постоянная.

Результаты представлены в масштабе закона Аррениуса (рис.3): $ln(R)=f(1/T)$. Действительно, при температуре около 120 ^{o}C наблюдается излом зависимости $lnR=f(1/T)$. Поэтому прогноз, выполненный по результатам ускоренных испытаний при

t > 120 °С, может дать завышенные значения. Это было учтено при интерпретации данных ресурсных испытаний, представленных на рис.3, кривая 3.

На рис.3 через указанные выше две точки - 350 час при 130 °С и 1750 час при 110 °С - в масштабе закона Аррениуса проведена линия ресурса 3. Ее пересечение с линией максимальной рабочей температуры 4 определяет прогнозируемый ресурс изоляции (средний ресурс). Как видно, он составляет около 65 тыс. час, т.е. 8 лет.

Учитывая ограниченные сроки ресурсных испытаний, полученную оценку следует считать ориентировочной. Она подтверждает, что исследованные изделия не содержат грубых технологических дефектов, которые могли бы привести к резкому снижению фактического ресурса по сравнению с установленным в ТУ минимальным сроком службы 10 лет.



1 - изоляция АВК-6/6; 2 – изоляция АВК-10/10; 3 – оболочка АВК-6/6; 4 – оболочка АВК-10/10; 5 – изоляция и оболочка АВК-6/6; 6 – изоляция и оболочка АВК-10/10

Рисунок 1-Кинетика убыли массы при температуре 130 °С для изоляции и оболочки образцов кабелей АВК-6/6 и АВК-10/10

Кривые со штрихами – то же, но при температуре 110 °С.

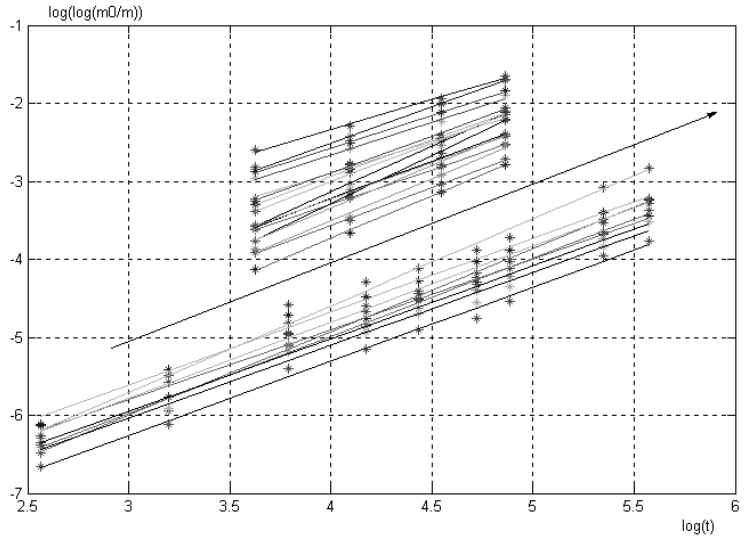


Рисунок 2 - Те же данные, что на рис.1, но в функциональном масштабе $ln(ln(m_0/m))= f[ln(\tau)]$.

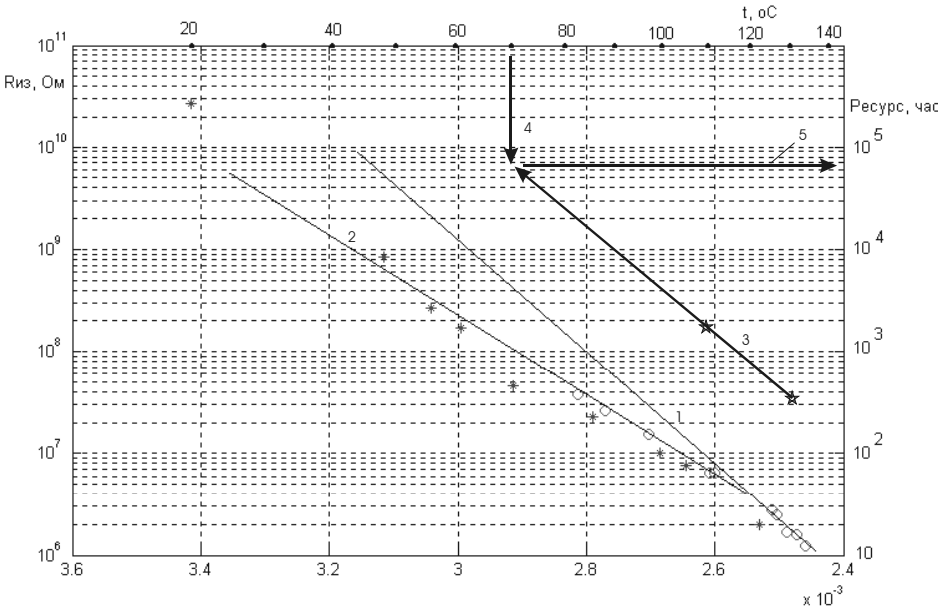


Рисунок 3 - Зависимости от температуры характеристик кабелей АВК: сопротивления изоляции (1, 2) и ресурса (3)

Выводы

1. Уменьшение массы ПВХ-материалов кабелей АВК в процессе теплового старения подчиняется экспоненциальному закону (4) с коэффициентом *n*, близким к единице. Поэтому зависимости *m(τ)* удовлетворительно спрямляются в полулогарифмическом масштабе рис.1, в котором удобно выполнять прогноз момента достижения критического состояния, когда потеря массы достигнет 20%.
2. Зависимость сопротивления изоляции кабелей от температуры подчиняется экспоненциальному закону (6), причем при температуре около 120 ^{o}C наблюдается излом зависимости *lnR=f(1/T)*, связанный с изменением энергии термоактивации W_R носителей заряда. Это указывает на возможность изменения в этом же диапазоне температур и энергии активации W_p , что следует учитывать, выбирая наклон линии 3 прогноза ресурса.
3. Оценка ресурса изоляции исследованных образцов кабелей АВК-6/6 и АВК-10/10, выполненная путем измерения убыли массы при температурах 130 и 110 ^{o}C, оказалась близкой к нормативному уровню. Фактическое значение температуры будет значительно ниже предельно допустимой 70 ^{o}C. Поэтому и фактический ресурс кабелей будет выше выполненной оценки.
4. Образцы, прошедшие ускоренные ресурсные испытания, имеют видимые отличия по цвету, повышенную жесткость и склонность к растрескиванию оболочки при изгибах. Они потрескивают при изгибах, хотя выдерживают испытательные напряжения 2000 В частоты 50 Гц в течение 5 мин., принятые для новых изделий.

Список литературы

1. ТУ-РТ MD 29-0213048-002-98.
2. ТУ У 31.3-00214534-011-2002.
3. IEC 216 Standard, Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials. Fourth issue (1990 - 1994).
4. Положение по определению технического состояния и управлению старением кабелей на АС. – М.: РОСЭНЕРГОАТОМ. – 2002. – 102 с.
5. Григорьян А.Г., Дикерман Д.Н., Пешков И.Б. Производство кабелей и проводов с применением пластмасс и резин. – М.: Энергоатомиздат.- 1992. – 304 с.

УДК 621.311

П.Г. Плєшков, Л.Г. Віхрова, доценти, канд. техн. наук, М.В. Кубкін
Кіровоградський національний технічний університет

Аналіз видів невизначеності інформації, характерних для процесу управління системами електропостачання

В статті розглянуто та проаналізовано види невизначеності які характерні для процесу управління та прийняття рішень в системах електропостачання.
системи електропостачання, невизначеність, модель

В контексті сучасної енергетичної кризи дедалі більшої актуальності набуває проблема енергозбереження, зокрема проблема раціонального управління електроенергетичним господарством. Велика кількість взаємозв'язків та їх динамізм обумовлюють складність вирішення задач управління. Тому розробці методів прийняття рішень в складних ситуаціях приділяється велика увага [1, 2, 3]. Якщо казати коротко, то основні труднощі прийняття рішень викликані багатокритеріальністю та невизначеності в оцінці наслідків. Невизначеність інформації є атрибутом процесу управління будь-якою великою системою. Вона проявляється через закони, які функціонують в ній, та задачі, які виникають при управлінні, що накладає свій відбиток на методологію їх вирішення.

При експлуатації систем електропостачання виникають наступні види невизначеності: замала точність інформації з об'єкту управління; нечіткість в процесі прийняття рішення; неточність моделей об'єктів контролю та управління; труднощі представлення знань диспетчера у вигляді алгоритмів та узгодження отриманого ЕОМ рішення з його оцінкою.

Необхідність роботи в таких умовах ускладнює використання стандартних систем автоматики. Особливо важким є опис областей допустимих режимів роботи обладнання в таких умовах, так як завдання жорстких (чітких) обмежень для систем автоматики призводить в наш час до відключення цих систем диспетчером.

Коли диспетчер стикається з невизначеністю реальної системи в процесі прийняття рішень, то він чинить різними способами:

1) найчастіше свідомо (або несвідомо) ігнорує існування невизначеності та використовує детерміновані моделі;

2) обирає один найбільш суттєвий, з його точки зору, вид невизначеності та використовує відповідну теорію, так як розроблені нині кількісні моделі прийняття рішень допомагають обрати найкраще з множини можливих рішень лише в умовах конкретного виду невизначеності;

3) проводить додаткові дослідження системи або отримує інформацію в ході контролю (адаптація та навчання) або управління (дуальне управління системою).

Особливості вирішення задач в реальному масштабі часу призводить до того, що недолік обчислювальних можливостей (невідповідність обчислювальних ресурсів складності задачі) еквівалентне недоліку інформації про умови задачі.

Відповідно до роботи [4], невизначеність має місце, коли універсальна множина складається більш ніж з однієї точки. Якщо для цих елементів множини задані відповідні імовірності або інші імовірнісні характеристики, то має місце *імовірнісна невизначеність*. Якщо відомі тільки граничні елементи множини – *інтервальна невизначе-*

© П.Г. Плєшков, Л.Г. Віхрова, М.В. Кубкін. 2004

ність. І, нарешті, при завданні для кожного елемента множини відповідної степені приналежності – *нечіткість*.

Класифікація невизначеності за різними чинниками приведена на рис.1.

Рисунок 1 – Класифікація невизначеності

Для широкого класу задач апріорна невизначеність може бути зведена до параметричної, коли імовірнісні закони розподілу для ситуації, величин та процесів, які досліджуються, відомі з точністю до скінченої кількості параметрів.

Системою можна управляти або на основі апріорних даних у вигляді програми на весь період функціонування системи, або за допомогою процедур адаптивної та рекурентної оцінки для усунення апріорної параметричної невизначеності з використанням принципів управління із зворотнім зв'язком. В цьому випадку прийняття рішення не являє собою одиничний акт, а продовжується в ході спостереження за об'єктом управління.

В теорії управління з неповною інформацією важливе місце належить задачам, в яких невідомі параметри об'єкту управління задані з точністю до апріорних оцінок, а процеси управління та ідентифікації повинні відбуватись одночасно.

Остання обставина призвела до появи теорії дуального управління, де, як правило, невідомим параметрам приписують імовірнісні розподіли, які задані з точністю до апріорних оцінок випадкових величин.

Присутність в процесі прийняття рішень невизначеності не дозволяє точно оцінити вплив керуючих дій на цільову функцію. Якщо невизначеності, які існують як в системі, так і в спостереженнях, можуть бути представлені як стохастичні процеси, то до таких задач можна застосувати методи стохастичного управління. Але є досить великий клас проблем, при вирішенні яких ці методи неефективні. Останнє можна пояснити тим, що набір стандартних імовірнісних понять та методів виявляється неадекватним для опису ситуації, що розглядається, а також важкістю отримання необхідних статистичних характеристик параметрів, відсутністю ергодичності процесів та їх суттєвою нестаціонарністю [5]. Джерело невизначеності може не мати випадкового характеру, а іноді бути повністю або частково детермінованим. Складність систем та невизначеність інформації про них зростають, також збільшується вимоги до точності рішень, що отримуються. Проблема представлення невизначеності є однією з ключових, але в той же час найменш вивченою для систем електропостачання [1].

Похибки розрахунку складаються із похибок вихідних даних, похибки моделі та похибки методу розв'язку (чисельного методу). Для багаторівневих ієрархічних систем

управління спостерігається достатньо велике зростання похибок вихідних даних, в залежності від номера рівня управління, на якому виконується розрахунок. Зростання похибок в даних обумовлено запізненням та спотворенням даних при передачі від рівня до рівня, фільтрацією їх на кожному рівні і неможливістю передачі низки даних з періодичністю, яка вимагається, внаслідок їх великого об'єму та обмеженій пропускній здатності каналів зв'язку. В принципі можливо здійснити отримання на достатньо високих рівнях управління докладних даних про окремі процеси або стан устаткування, проведення низки додаткових замірів на обладнанні та в системі. Однак найчастіше збір такої інформації організовується для проведення окремих науково-дослідних розрахунків. Для виробничих цілей, коли збір інформації необхідно здійснювати в режимі реального часу, такий підхід буде вже непридатним.

Дуже важливим є правильний вибір для відповідного рівня управління моделі і об'єму даних, які передаються для розрахунку. Ускладнення математичної моделі, яка враховує велику кількість параметрів, призводить до зниження похибки, яка вноситься моделлю. Однак при великій розмірності моделей дуже суттєвою є складова похибки, яка вноситься неточністю аналітичних та чисельних методів, що застосовуються. Час вирішення задачі великої розмірності також може не задовольняти вимогам при вирішенні її в реальному масштабі часу. Ускладнення математичної моделі потребує також збільшення об'єму даних, які передаються з нижнього рівня, а також призводить до росту відповідної складової похибки. Тому потрібно знаходити розумний компроміс між цими факторами в залежності від рівня управління.

Застосування в системі управління апаратури передачі інформації між рівнями, засобів обчислювальної техніки, міжмашинного обміну інформації дозволяє значно знизити рівні похибок даних і розрахунків для вищих рівнів управління. За рахунок можливостей використання більш складних математичних методів на ЕОМ значно збільшується обґрунтованість та ефективність оперативних рішень, що приймаються.

В складних системах енергетики співвідношення між складовими похибки для усталених режимів складають [6]:

1) з-за неточності вихідних даних – 82-84%;

2) з-за неточності моделі – 14-15%;

3) з-за неточності методу – 2-3%.

Зважаючи на велику частку похибки вихідних даних, виникає і похибка в розрахунку цільової функції, що призводить до значної зони невизначеності при виборі оптимального режиму роботи системи. Звідки виникає необхідність розробки методів, які враховують невизначеність вихідних даних при вирішенні задач багаторівневого управління системою.

Питання прийняття рішень в умовах великих похибок вхідних даних, в тому числі викликаних відмовами пристроїв вимірювання та передачі даних обговорювались в ряді праць [6, 7].

Всі ці методи можна поділити на дві основні групи:

1) заглушення впливу неточної інформації з подальшим використанням звичайних детермінованих алгоритмів;

2) перехід при наявності неточної інформації на спеціальні алгоритми (стохастичні, інтервальні, нечітки).

Для першого напрямку характерним є застосування різних методів фільтрації та згладжування вихідної інформації, усереднення та зважування даних. Використовуються також методи відновлення даних, які відсутні, інтерполювання та екстраполювання, робастні алгоритми [7].

Властивість робастності виділяє клас процедур які нечутливі до невеликих змін вихідних (початкових) припущень. Як зазначено в [7], попередня фільтрація даних, їх

редагування та згладжування з послідуючим використанням класичних процедур контролю та оптимізації не дають бажаного результату в наслідок наступних ускладнень:

1) важко розмежувати використання процедур згладжування та відсікання викидів не використовуючи моделі технологічного процесу;

2) згадані вище алгоритми можуть бути набагато складніше алгоритмів робастного оцінювання;

3) робастні процедури, як показує практика, дають більш кращі результати.

При розв'язку задач в детермінованій постановці з ростом складності та розмірності моделі виникають великі проблеми із стійкістю задач оптимізації. Сам процес оптимізації припускає вивід системи на певні граничні обмеження. В цій ситуації навіть незначні коливання другорядних параметрів (наприклад, напруги) можуть привести до втрати режиму. На практиці диспетчерської служби не притримуються цих меж з такою точністю – до другого-третього знаку після коми, та й багато обмежень частіш за все є "м'якими", які допускають їх незначне порушення. Просто розширити ці обмеження неможливо – процедура оптимізації доведе режим до нових меж та проблема стійкості залишиться. Тому тільки представлення ряду обмежень як нечітких дає змогу отримати стійке рішення в умовах похибки інформації та нечіткості виробничих обмежень із вказівкою зниження ступені допустимості цього режиму, тобто у вигляді функції приналежності. Постановка задачі в нечіткій формі також значно знижує можливість отримання несумісних рішень при розрахунку та оптимізації. Принциповим недоліком детермінованих моделей систем є відсутність ефективних методів порівняння різних можливих моделей по призначенню моделі, її похибці та адекватності припущень, покладених в її основу [8]. Побудова моделі в рамках нечіткого підходу дозволяє порівнювати моделі та надавати точний смисл таким поняттям як "значимий" та "нехтуємий". З'являється можливість формалізації неточних знань про предметну область, внесення в модель знань про неповноту інформації.

За рахунок врахування умов існування моделей, самих особливостей мінімаксних операцій Л.Заде за допомогою використання апарату нечітких множин [9] вдалося добитися робастності алгоритмів, тобто їх нечутливості до малих відхилень від припущень (наприклад, про нестаціонарність режиму). Мається також роботи [10], в яких відзначено робастність по функціям приналежності, тобто к ситуаціям, в яких істинна функція незначно відрізняється від апріорно заданої.

Існують методи зведення задач управління системами в умовах невизначеності до детермінованого управління. За допомогою детермінованого підходу будуються різні регулятори, які забезпечують стійку поведінку динамічних систем при наявності невизначеності елементів математичних моделей, які викликані недосконалістю моделей (неточністю параметрів) або зовнішніми збуреннями (невизначеність входів). При наявності меж невизначеності елементів регуляторів використовують цю інформацію із застосуванням оберненого зв'язку. При відсутності даних про ці межи застосовують адаптивні регулятори.

При використанні стохастичних моделей виникає цілий рад труднощів, які пов'язані із складністю отримання щільностей розподілу імовірностей для параметрів, нерегулярними явищами при розв'язанні стохастичних диференціальних рівнянь.

Багато задач, які були отримані в результаті декомпозиції, є некоректно поставленими [11], тобто будь які незначні зміни вихідних даних можуть призвести до великих змін в розв'язку. Особливо це характерно для так званих обернених задач. Дані для розрахунку, які отримуються з давачів та контрольно-вимірювальних приладів, завжди мають похибку, іноді дуже значну. Тому необхідно у всіх задачах розрахунку та оптимізації використовувати методи стійкого наближеного рішення некоректно поставле-

них задач. Ці методи базуються на використанні додаткової апріорної інформації про шукане рішення [11]. Прикладами такої додаткової інформації є:

1) інформація про монотонну, незначну зміну в часі деяких параметрів (наприклад, в наслідок інерційності об'єкту);

2) апріорна інформація про приналежність рішення деякій компактній множині коректності.

Для оптимізації складних розподільчих систем використовують методи багаторівневого управління, основою якого є ідеї декомпозиції та координації. В результаті декомпозиції складна система розподіляється на групу більш дрібних підсистем з таким взаємозв'язком, щоб глобальна задача оптимізації перетворювалась в групу локальних задач оптимізації, тобто окремі рішення будуть прийматись по обмеженій інформації, без використання всього об'єму знань. Перехід до ієрархічної структури правління звужує в загальному випадку множину допустимих стратегій, але одночасно знижує і рівень невизначеності, тобто робить можливим отримання більш якісного розв'язку.

Таким чином сучасні класичі методи управління , які базуються на детермінованому або імовірнісному підході не можуть в повному обсязі задовольнити вимоги до управління системами електропостачання, особливо в складних умова. Використання сучасних підходів до опису складних систем – теорія нечітких множин, інтервальний аналіз ,нейромережеві алгоритми – дозволяють значно збільшити адекватність моделей управління та покращити якість останнього.

Список літератури

1. Анализ и управление режимами систем электроснабжения в условиях неопределоенности. – Новосибирск, 1990. – 118 с
2. Борисов А.Н. и др. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной – Рига: Зинатне, 1982. – 256 с.
3. Манусов В.З., Моисеев С.М., Озерных И.Л. Моделирование режимов систем электроснабжения в условиях неполной информации: Учебн. пособие / Новосиб. Электротехн. Ин-т. – Новосибирск, 1985. – 75 с.
4. Кандель А., Байатт У.Дж. Нечеткие множества, нечеткая алгебра, нечеткая статистика // Труды американского общества инженеров-радиоэлектроников, – 1978. т. 66, №12 – С.37-6112
5. Казанцев Ю.И., Ольховский В.Я. Нестационарная модель и метод расчета электрических нагрузок предприятий с массовым выпуском однородной продукции // Изв. Вузов. Электромеханика. – 1973. – №2. – С. 227-233.
6. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем. – М: Мир, 1973. – 235 с.
7. Хьюбер Дж.П. Робастность в статистике. – М: Мир, 1984. – 304 с.
8. Кашьян Р.Л., Рао А.Р. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным – М: Наука, 1983. – 384 с.
9. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений – М: Мир, 1976. – 165 с.
10. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. – М: Радио и связь, 1986. – 408 с.
11. Тихонов А.Н. Регуляризующие алгоритмы и априорная информация. – М: Наука, 1983. – 200 с.

УДК 621.316.9

О.П. Чорний, доц., канд. техн. наук, Ю.В. Лашко, О.А. Донченко
Кременчуцький державний політехнічний університет

Інтелектуальний пристрій захисту асинхронних двигунів

У статті визначена необхідність удосконалення систем захисту електродвигунів, дано опис принципів побудови пристрою інтелектуального захисту асинхронних двигунів.
технічний стан, енергопроцес, показники якості перетворення енергії, інтелектуальний захист

Асинхронні двигуни (АД) являються найпоширенішим типом електричних машин (ЕМ) різних галузей промисловості. Надійність роботи АД в певній мірі визначає, в широкому смислі, ефективність виробництва, що являється запорукою якості продукції, рентабельності і конкурентоспроможності підприємств та їх прибутковості.

На жаль, досягненню зазначених показників виробництва, за результатами аналізу статистичних даних, перешкоджає високий відсоток аварійного виходу з ладу АД – щорічно ремонтується 20-25% від загального числа встановлених АД, який обумовлений: браком виготовлення, недоліками і тяжкими умовами експлуатації та неякісним ремонтом. Усунення або зменшення впливу зазначених причин потребує вирішення широкого спектру задач, які визначають напрямки й шляхи підвищення надійної експлуатації електродвигунів, їх збереження та продовження терміну служби. Серед напрямків, що розвиваються слід відзначити впровадження і застосування комплексу заходів, який являється складовою частиною концепції енергоресурсозбереження [1]. Цей комплекс містить у собі системи енергетичної діагностики, моніторингу та захисту [2] і, в окремому випадку, утворює систему аварійного захисту ЕД. Методи енергодіагностики та енергомоніторингу базуються на аналізі фізичних процесах, що протікають в ЕМ і відкривають нові можливості щодо реалізації нового класу пристроїв захисту ЕД та електроприводу - інтелектуального захисту [3,4], - з новими функціональними можливостями.

Метою роботи являється обґрунтування та розробка принципів побудови пристрою інтелектуального захисту асинхронного двигуна.

На даний час в енергетичній промисловості використовуються різноманітні пристрої захисту, значну кількість з яких представляють пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА), виконані на застарілій електромеханічній елементній базі і її характеристики не задовольняють сучасним вимогам щодо точності, швидкодій, енергоспоживанню тощо.

В останні роки своє визнання набувають мікропроцесорні пристрої захисту. Визнаними лідерами, виробниками мікропроцесорних пристроїв РЗА (МП РЗА) являються концерни ABB, Schneider Electric, SIEMENS, ALSTOM. Пристрої цих фірм мають високі технічні характеристики (наприклад, потужність, що споживається від вимірювальних трансформаторів струму і напруги, знаходяться на рівні 0,1-0,5 ВА, апаратна похибка — в межах 2-5 %.) і відрізняються багатофункціональністю (цифрові пристрої інтегровані в рамках єдиного інформаційного комплексу функцій релейного захисту, виміряння, регулювання та управління). Слід відмітити, що перехід на мікропроцесорну елементну базу не привів до нових принципів реалізації РЗА, їх будова має багато спільного, а структурні схеми цих пристроїв дуже схожі.

© О.П. Чорний, Ю.В. Лашко, О.А. Донченко. 2004

Варіантність існуючих пристроїв захисту, притаманні їм властивості, принципи побудови тощо не дозволяють однозначно вирішити питання захисту ЕМ.

Розглядання питання захисту в комплексі "мережа-двигун-навантаження" дозволяє відмітити особливості кожного елемента в цьому комплексі та виділити ті з них, які визначають якість та надійність системи захисту. Так, за межі існуючої концепції щодо побудови систем захисту ЕД, їх схемної реалізації; вимогам щодо селективності, швидкодії та чутливості; регламентованим ПУЕ й спеціальним типам захисту, що мають традиційні методики визначення уставок спрацювання виходять питання урахування індивідуальних характеристик двигуна набутих під час його експлуатації, що обумовлює важливий недолік пристроїв захисту різного виконання.

Питання полягає в тому, що технічний стан двигуна визначається значеннями певних технічних параметрів відповідно яким виконується настройка параметрів і уставок спрацювання захисту. Причому, для захисту застосовується певна обмежена кількість технічних параметрів, а його настройка виконується на момент підготовки двигуна до експлуатації відносно його номінальних параметрів і змінюється лише тільки після проведення сертифікації машини.

Параметри технічного стану електродвигунів можуть змінюватися внаслідок зміни його поточного (реального) технічного стану, який формується в процесі експлуатації машини. Ці зміни проявляються через появу неврівноваженості електромагнітної та механічної систем, якої двигуни набувають як в результаті природного зношення і фізичного старіння елементів конструкції, так і в результаті термічних і динамічних впливів, яких вони зазнають під час експлуатації. Ці впливи обумовлені тепловими, електромагнітними, механічними процесами, характером і динамікою їх розвитку, різноманіттям можливих форм взаємодії, умовами охолодження та початковим (сформованим) технічним станом ЕД, індивідуальною надійністю окремих його елементів [1], виникненням і проявленням пошкоджень [5].

З питаннями технічного стану пов'язана проблема експлуатації ЕД, які пройшли стадію капітального ремонту. Наприклад, відомо, що у результаті ремонту змінюються властивості електротехнічної сталі двигуна [6], появляється конструктивна несиметрія електричних і магнітних ланцюгів, що призводить до зниження величини магнітної індукції при загальному зростанні втрат у пакетах сталі [6], а наявність у них замкнених та розпушених ділянок на яких посилюється вплив вихрових струмів призводить до зниження значення результуючого магнітного потоку тощо.

Зазначені аспекти, в тій чи іншій мірі, пов'язані з енергетикою машини - процесами перетворення енергії. Це вказує на те, що в системі захисту "мережа-двигун-навантаження" "найслабкішим" місцем являється двигун, як електромеханічний перетворювач енергії. У цьому зв'язку постає задача необхідності контролю та оцінки в системі захисту його реального технічного стану. Важливим є те, що кожний з двигунів має свої певні показники (застосована група показників наведена нижче), які визначаються станом його конструктивних елементів та характером фізичних процесів, які лежать в основі процесів перетворення енергії, що дозволяє визначити допустимі межі використання в промислових умовах конкретного ЕД [1] та безпосередньо реалізувати заходи щодо його ефективного й надійного захисту.

Реалізація такого захисту потребує розробки нових принципів побудови та відповідного математичного й алгоритмічного забезпечення. У роботах [3,4] визначені основні положення щодо побудови такого захисту названого інтелектуальним захистом (ІЗ). Робота ІЗ забезпечує можливість упередження розвитку нештатного режиму роботи, шляхом оцінки ступеню і динаміки його зміни, врахування індивідуальних особливостей двигуна, яких він може набути в процесі експлуатації, змінювання уставки спрацювання залежно від поточного режиму роботи двигуна [7].

Щодо реалізації пристрою ІЗ слід відмітити, що він в жодному разі не “відкидає” існуючих систем захисту та може бути виконаним у вигляді автономного або термінального пристрою, сумісного з традиційними пристроями релейного захисту. Принципова та функціональна схема одного з варіантів системи захисту, який реалізується, наведена на рис.1.

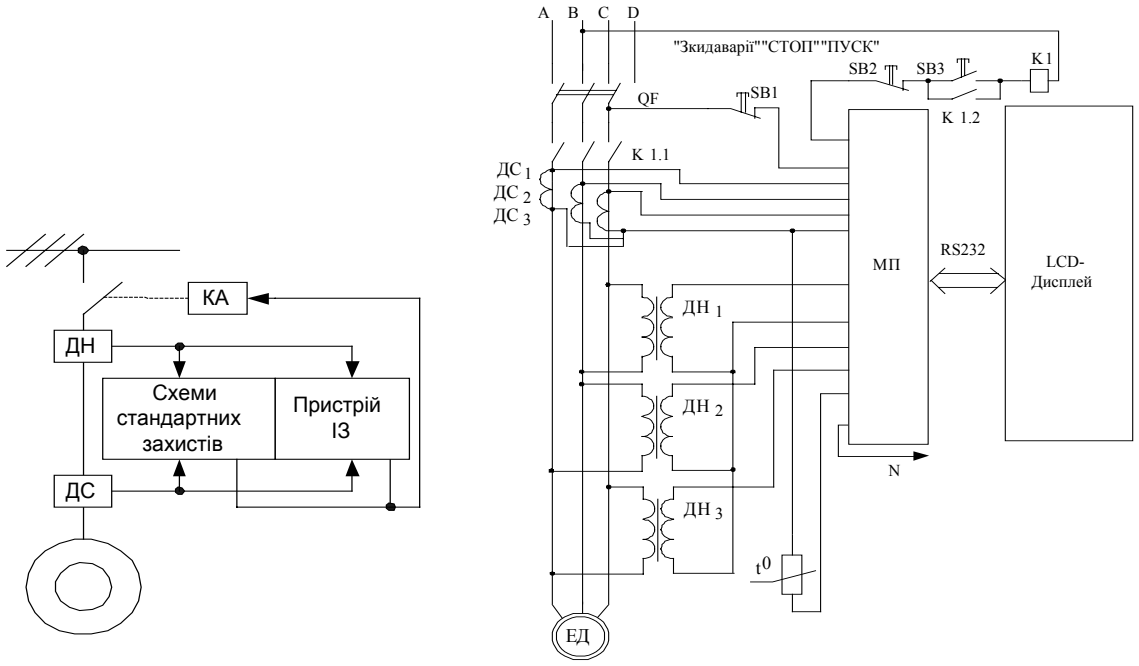


Рисунок 1 – Функціональна (а) та принципова (б) схеми системи захисту ЕД з інтелектуальним захистом

Принципи побудови алгоритмів роботи пристрою ІЗ можуть бути різними, але склад апаратного забезпечення залишається незмінним, що узгоджується з загальними принципами побудови МП РЗА [8]. При цьому повинні бути розглянутими та узгодженими питання щодо: технічних засобів; програмного забезпечення; оперативних елементів місцевого контролю, управління та сигналізації стану пристрою; реєстрації, збереження, протоколювання та видачі інформації; реєстрації аварійних подій; надійності тощо.

Для реалізації пристрою ІЗ застосовано загальноприйнятий модульний принцип, що дозволяє забезпечити роботу справних модулів при відмовах або несправностях у сусідніх модулях та незалежність реалізації заданих функцій при утраті будь-яких з них. Безумовно, архітектура обчислювальної системи та номенклатура модулів ІЗ визначається як задачами захисту, так і спектром додаткових функцій. У загальному випадку пристрій ІЗ містить модуль пристрою зв’язку з об’єктом, мультиплексор, аналогово-цифровий перетворювач, процесорний блок, модулі дискретного вводу та виводу, блок інтерфейсу “людина-захист”, блок зв’язку з верхнім рівнем, блок живлення. Серед зазначеного складу технічних засобів коротко зупинімося на побудові центрального блоку пристрою - процесорного блоку. Він управляє роботою обчислювальної системи пристрою та може бути виконаним на базі одного або декількох процесорів. При цьому вибір виконання процесорного блоку залежить від певних функціональних задач пристрою. Найкращим вибором його реалізації являється застосування цифрових процесорів обробки сигналів та у разі застосування декількох процесорів він може бути виконаним по схемі з одним ведучим процесором (хост-

процесор). Важливим елементом процесорного блоку є зовнішня пам'ять (флеш-пам'ять, або ПЗП) для збереження уставок, результатів самореєстрації функціонування, програмного забезпечення тощо.

Програмне забезпечення (ПЗ) ІЗ також узгоджується з загальноприйнятими принципами реалізації, що висунені до МП РЗА. А саме, ПЗ залежно від зазначеного вище можливого варіанту реалізації пристрою ІЗ поділяється на системне (ПЗ) та прикладне (ПЗ). Системне ПЗ містить операційну систему реального часу та тестове ПЗ. Операційна система процесорного блоку з одним процесором забезпечує паралельне виконання задач. Операційна система процесорного блоку з кількома процесорами забезпечує організацію паралельної роботи процесорів. Тестове ПЗ містить програми тестів, які виконуються при пуску та перезапуску процесорного блоку та з заданою періодичністю у фоновому режимі. Також, ПЗ повинно забезпечувати контроль справності апаратних засобів і цілісності ПЗ. Прикладне ПЗ повинно здійснювати виконання алгоритмів контролю та захисту, реєстрацію його функціонування та додатковий контроль правильності вхідних даних.

На рис. 2 зображена загальна структура прикладного ПЗ пристрою ІЗ, яка реалізує його математичне забезпечення. Попередньої конфігурації потребують блоки "Реальний паспорт АД", який містить паспортні дані (або дані надані ремонтним підприємством) та блок "Уставки", який містить уставки: за струмом I_y, температурою τ_y тощо. Слід відмітити, що в якості уставки, відповідно з конфігурацією пристрою, за результатами функції прогнозу та визначення динаміки зміни поточної температури, рівня вібрації тощо може бути використаною уставка за часом t_y.

Отримавши дані з блоку "Первинна обробка інформації", здійснюється їх накопичення та обчислення миттєвих значень середньої потужності P й потужностей по кожній фазі P_{ABC}. В блоці "Обчислення та порівняння" обчислюються на основі апарату вейвлет-аналізу значення характеристики режиму h_P [9] та обрана група [7] показників якості перетворення енергії [1]:

- коефіцієнт ефективності використання споживаної енергії в цілому для машини k_P й по кожній фазі $k_{P\,ABC}$;
- коефіцієнти нерівномірності завантаження фаз струмом $k_{I\,ABC}$ і нерівномірності тепловиділення в обмотках $k_{\tau\,ABC}$;
- коефіцієнт якості перетворення моменту k_M;
- коефіцієнт, який відображає погіршення вібраційних характеристик електричної машини k_V;

та інших параметрів (температури фаз обмоток τ_{ABC}, опорів обмоток статору $R_{s\,ABC}$ тощо).

У цьому ж блоці виконується порівняння обчислених значень з уставками та у разі виходу цих значень за межі встановлені значеннями уставок здійснюється формування сигналу на відключення АД від мережі (блок "Формування сигналу на відключення"). У випадку "дозволеного" режиму роботи АД у блоці "Аналіз та прогноз" забезпечена можливість оцінки ступеню й динаміки енергопроцесів на підставі обчислених показників, визначення часу, протягом якого двигун може робити відповідно виконаній оцінці поточного режиму. Інформація з цього блоку, зокрема використовується у блоці "Зміна уставок", що дозволяє змінити уставки враховуючи реальні фізичні процесів та можливу зміну технічного стану двигуна.

У будь яким момент часу за вимогою оператора або відповідно з виконаною конфігурацією пристрою на дисплей пристрою (блок “Повідомлення”) виводиться поточна інформація щодо обчислених показників та поточних величин уставок.

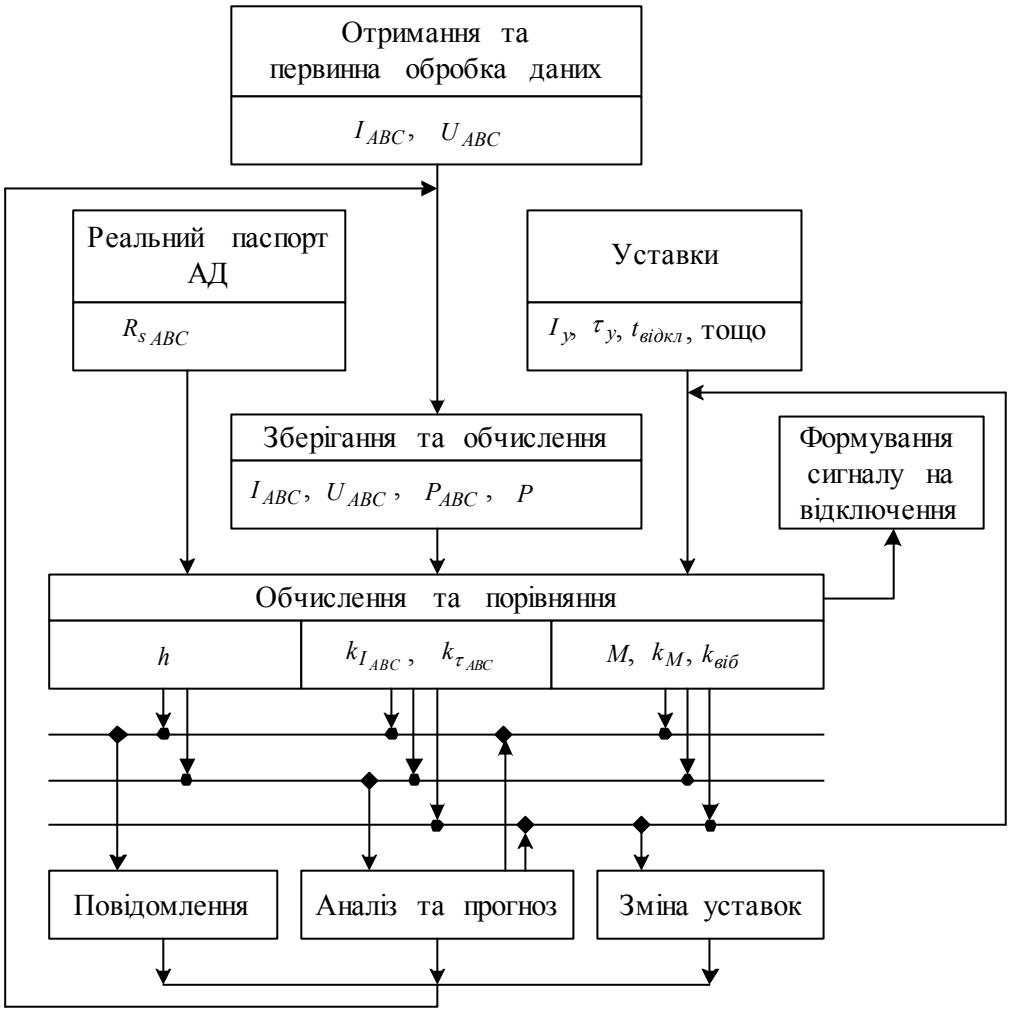


Рисунок 2 – Загальна структура прикладного ПЗ пристрою інтелектуального захисту

У поданій загальній структурі прикладного ПЗ (рис. 2) коротко розглянемо склад математичного забезпечення ІЗ. Виходячи з призначення уведеної характеристики режиму та групи енергетичних показників, які у сукупності, зокрема володіють властивостями виявлення зміни та контролю режиму роботи двигуна, можливим є їх застосування в якості набору логічних ознак для реалізації зазначених властивостей. Так, реалізація цих властивостей забезпечена через обчислення логічного виразу (1), який у загальному записі має вигляд:

$$\begin{aligned}&(h_P > a_1 \cdot 0.5)\,\&\,(P < a_2 P_{доп})\,\&\,(P_m \ge a_3 P_{ABC\,доп})\,\&\,(k_{I\,m} \ge a_4 k_{I\,доп})\\&\&\,(k_{\tau\,m} \ge a_5 k_{\tau\,доп})\,\&\,(k_M \ge a_6 k_{M\,доп})\,\&\,(k_V \ge a_7 k_{V\,доп})\,\&\,(t > t_{доп})\end{aligned}\,, \qquad (1)$$

де a_i, $(i = 1..7)$ - коефіцієнти, які, по суті, являються значеннями уставок (сигналізації чи відключення);

$P_{доп}$, $P_{ABC\,доп}$, $k_{I\,доп}$, $k_{\tau\,доп}$, $k_{M\,доп}$, $k_{V\,доп}$, $t_{доп}$ - допустимі величини відповідних параметрів, значення яких вказуються при конфігурації ІЗ, причому, ці значення повинні опиратися на реальний паспорт (реальний технічний стан) ЕД, або, у

загальному випадку, на номінальні значення (наприклад, для перших трьох відповідно 1; 0,33; 1 в.о.);

$$P_m = \max_{j=A,B,C}\{P_j\},\ k_{I\,m} = \max_{j=A,B,C}\{k_{I\,j}\},\ k_{\tau\,m} = \max_{j=A,B,C}\{k_{\tau\,j}\}.$$

Підкреслимо, що вигляд виразу (1) є загальним, практично обчислюється оптимізований варіант цього виразу, в якому не використовується третя логічна умова, а остання формується динамічно на підставі обчислених показників, обчислених за математичною моделлю нагріву значень температури фаз обмоток та виконаного їх аналізу за критерієм максимального відхилення від нормованих значень. Результатом даного аналізу являється формування ознак режиму та їх розташовуються за рангом. Ця інформація дозволяє визначити порядок виконання задачі прогнозу для оцінки динаміки зміни режиму за певним показником та температурою. Прогноз виконується для оцінки лінійного або квадратичного тренду та визначення можливого часу роботи двигуна у поточному режимі. Тип прогнозу обирається на основі роботи цього ж блоку. Доцільним є уведення, залежно від завантаження та виконання процесорного блоку пристрою, прогнозу на основі кривої росту (кривої Перла) [10]:

$$y = \frac{L}{1 + ae^{-bt}}. \qquad (2)$$

У рівнянні (2) L являється верхньою межею змінної у, а a і b – параметрами. Особливістю рівняння (2) являється те, що параметр a визначає місце кривої на часовій осі, а b визначає крутизну середньої частини кривої. Застосування рівняння (2) для прогнозування динаміки процесу за будь яким показником (параметром) обумовлено збереженістю загальної його тенденції у часі – спочатку деякий час значення параметру зростає, а потім коливається навколо сталого значення. Це дозволяє верхню межу L визначити з фізичних обмежень, які встановлюються технічними умовами на допустимому для даного двигуна рівні. У такому разі, задача зводиться до визначення значень a и b, які задовольняють кільком точковим даним, які відносяться до попередніх даних. Ці параметри дозволяють прогнозувати майбутнє зростання певного показника або групи.

За результатами виконаного аналізу, наприклад, визначення того, що поточний режим має тенденцію переходу до небезпечного виконується зміна уставки спрацювання. Наприклад, зміна уставки за струмом виконується згідно виразу:

$$I'_y = I_y \cdot (2 - \max_{j=A,B,C}\{k_{I\,j}\}), \qquad (3)$$

де I'_y - нове значення уставки.

Подібно виразу (3) здійснюється зміна уставки й для показника погіршення вібраційних характеристик машини.

Повний перелік функцій пристрою ІЗ складається, з так названих загальноприйнятих та нових функцій. Причому, робота обох груп функцій (саме контролю) ґрунтуються на обчислених енергетичних показниках. Першу групу функцій складають функції:

- контролю пускового та нормального режимів;
- контролю та визначення допустимого та недопустимого перевантажень, несиметрію напруги живлення, неповнофазного режиму, зниження напруги;
- контролю усіх типів короткого замикання, включаючи й виткові, несиметрії опорів обмоток статору;
- контролю, визначення перевищення температури обмоток.

Друга група містить функції, пов’язаних з першою та в певній мірі розширюючи їх. Так, функція контролю та визначення перевищення температури обмоток доповнюється прогнозом. До інших уведених, відносяться функції:

- контролю, визначення, оцінки, аналізу та прогнозу (розвитку нормального та аварійно небезпечного режимів роботи) енергетики машини;
- реагування та адаптації на будь-яку зміну параметрів мережі, технічного стану двигуна, навантаження через зміну уставок спрацювання захисту.

Запропонована система ІЗ реалізується на мікропроцесорній елементній базі, потребує мінімальну кількість інформації, що поступає з первинних пристроїв (датчики напруги і струмів) та початкової конфігураційної інформації (для завдання реального паспорту машини та уставок). Вона дозволяє з урахуванням індивідуальних особливостей ЕД проводити аналіз і оцінку робочого режиму та динаміку розвитку аварійної ситуації з його відключенням за упереджуючим принципом, що надає можливість своєчасно виявити небезпечні порушення в роботі агрегату, вивести його з роботи та провести діагностику. Виконання зазначених робіт, у свою чергу, реалізує принцип «вихід у ремонт за технічним станом» та забезпечує суттєве зниження витрат на проведення ремонтних робот.

Список літератури

1. Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А., Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах, Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету Вип. 1/2003 (18) 80-85 с.
2. Бойко В.С., Лашко Ю.В., Черный А.П., Живора В.Ф., Веласко Х.А Об уровнях и путях совершенствования защит высоковольтных синхронных двигателей. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2 (20), Т.2. – С. 205-210.
3. Лашко Ю.В., Черный А.П., Концепция построения интеллектуальных защит асинхронных двигателей.
4. Лашко Ю.В., Черный А.П. Критерии принятия решения в интеллектуальных защитах асинхронных двигателей: Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету Вип. 2/2003 (19) 34-39 с.
5. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин: Учеб. пособие. – М.: Высш.шк., 1988. –238с
6. Прус В.В Процесс старения электротехнической стали электродвигателей переменного тока во время работы, Вестник КДПУ, 1/1998..
7. Лашко Ю.В., Родькін Д.Й., Чорний О.П., Сидоренко В.М. Інтелектуальний захист електродвигунів з урахуванням критеріїв якості перетворення енергії, Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 67. ДонНТУ, 2003, С. 113-116
8. Шмурьев В.Я. Цифровые реле: Учеб пособие. - Санкт-Петербург, 1999- 80 с.
9. Лашко Ю.В., Чорний О.П. Вейвлет-аналіз в задачах контролю режимів роботи асинхронного двигуна та його захисту. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 2/2004 (25) – С. 161-164.
10. Дж. Мартино «Технологическое прогнозирование», Изд. Прогресс, М.: 1997, 590 с.

УДК 621.316

Г.П. Лю, доц., канд. техн. наук, Д.Г. Туркин
Дальневосточный государственный технический университет (ДВПИ им. В.В. Куйбышева)

Проблемы транспорта и потребления электрической энергии в жилищно-коммунальном секторе Приморского края

В статье описаны проблемы транспорта и потребления электрической энергии в жилищно-коммунальном секторе Приморского края и предлагаются мероприятия по повышению эффективности транспорта и потребления электрической энергии.
потери электроэнергии, электротранспорт, учет электроэнергии, энергоаудит

Потери электрической энергии

При анализе потерь электрической энергии принято разделять несколько форм их представления:

- фактические потери – являются суммой составляющих: технические потери, потери обусловленные инструментальной погрешностью приборов учета, технологический расход электроэнергии на собственные нужды подстанций и коммерческими потерями, определяются по разности показаний приборов учета поступления и отпуска электрической энергии;
- расчетные потери – определяются расчетным методом для определенного установившегося режима сети;
- нормативные потери – установленный контролирующей организацией приемлемый по техническим и экономическим критериям уровень потерь электроэнергии, определяют величину технологических потерь, возможную в данных распределительных сетях при условии внедрения определенного объема организационно-технических мероприятий по их снижению. Именно эта величина потерь используется предприятиями при определении тарифа на электроэнергию для проведения расчетов с АО-энерго и потребителями.

Динамика изменения величины технологических потерь электрической энергии в предприятиях коммунальной энергетики Приморского края (ПК) представлена на рис.1.

Данный график отражают нормативный уровень технологических потерь, устанавливаемый постановлениями РЭК ПК. Методика расчета и определения технической составляющей технологических потерь достаточно проработана и широко применяется сетевыми предприятиями. В то же время, учет потерь электрической энергии, обусловленных инструментальной погрешностью в их фактическом выражении по предприятиям Приморского края начат по инициативе РЭК ПК только с 2002 года и на сегодняшний день проработан недостаточно. Основная проблема здесь заключается в большом объеме входной информации, отсутствием доступных сертифицированных программных средств для автоматизации расчетов и недостаточной проработанностью использования методики расчета ввиду ее новизны.

© Г.П. Лю, Д.Г. Туркин. 2004

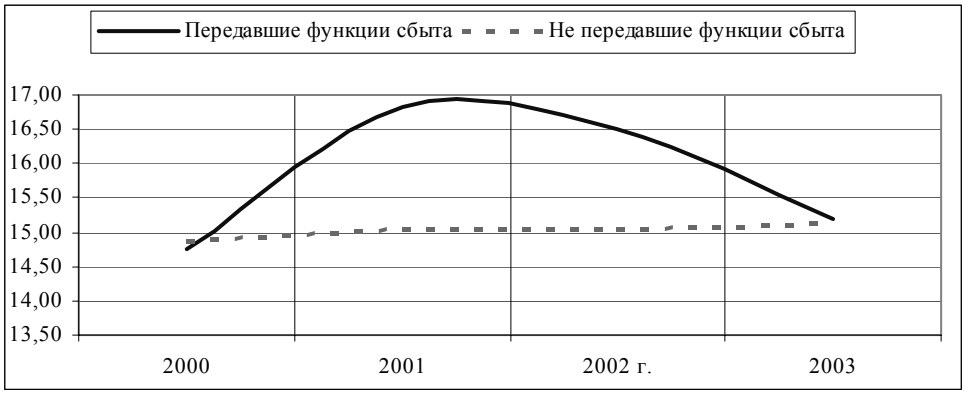


Рисунок 1 - Динамика среднего уровня технологических потерь в сетях предприятий коммунальной энергетики

Динамика потерь, представленная на рис. 1, отражает изменение технологических потерь, определенных как сумма технической и инструментальной составляющей.

Четкой тенденции на снижение технических потерь не наблюдается, а если учесть темпы современного обновления силового оборудования и модернизации распределительных линий электропередач, то можно предположить, что при росте электропотребления эта составляющая потерь также будет увеличиваться.

Кроме того, сам по себе уровень технических потерь, достигающий у отдельных предприятий величин 18-19% от отпуска в сеть, когда аналогичная составляющая в советские времена составляла порядка 8%, требует незамедлительного внедрения широкого комплекса организационно-технических энергосберегающих мероприятий, направленных на их снижение.

Техническая и инструментальная составляющие технологических потерь в процентах от отпуска в сеть предприятий представлены на рис. 2.

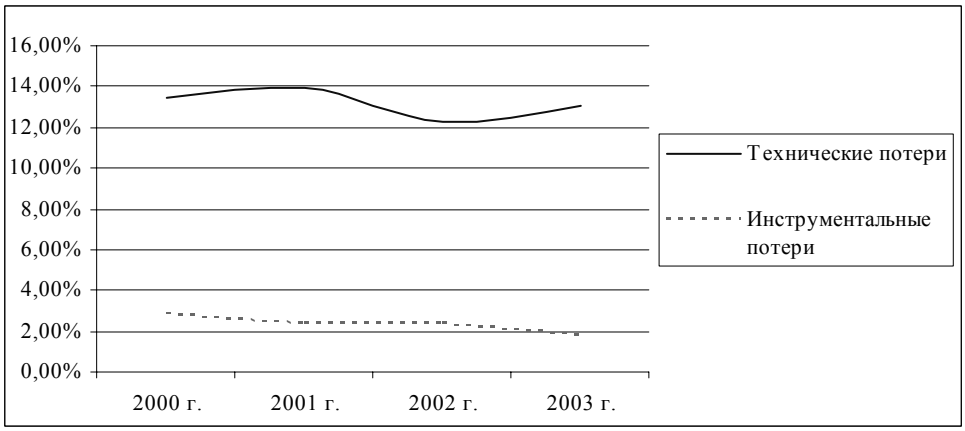


Рисунок 2 - Динамика технических и инструментальных потерь

Общая динамика технических потерь объясняется, прежде всего, ростом процентного соотношения потерь электрической энергии в сетях 0,4 кВ в связи с увеличением их протяжённости, количества абонентов на этом уровне напряжения и энергоемкости потребителей.

Средняя величина инструментальных потерь, отраженная на рис. 2 в 2003 г. по сравнению с 2002 г. снизилась, хотя по расчетам в отдельных предприятиях она достигает 3,5% и, если темпы замены устаревшего приборного парка не увеличатся,

будет расти.

Фактические потери электрической энергии в сетях предприятий коммунальной энергетики в отдельных случаях достигают 30% за счет дополнительных ***коммерческих потерь***, обусловленных целым рядом факторов:

- самовольные подключения потребителей;
- неоплата или несвоевременность оплаты потребителями полученной электроэнергии;
- махинации со средствами учета с целью занижения величины фактически потребленной электроэнергии;
- фактическое отсутствие приборов учета в местах общего пользования жилищно-коммунального сектора;
- низкая платежеспособность населения и т.п.

По состоянию на 2004 год коммерческие потери ни коим образом не учитываются в нормативе технологических потерь и борьба с ними целиком лежит на энергоснабжающих предприятиях.

Система учета электроэнергии

Для учета отпущенной электрической энергии используются приборы расчетного учета. Количество счетчиков по юридическим и физическим лицам указано в табл. 1 (данные на 01.01.2003 г. по отчету предприятий в РЭК ПК).

Таблица 1 - Количество средств учета предприятий коммунальной энергетики

Наименование предприятия	3х фазных, шт.	Однофазных, шт.	
	0,5-2,0	0,5-2,0	2,5
Передавших функции сбыта ОАО «Дальэнерго»	27046	24960	335903
Не передавших функции сбыта ОАО «Дальэнерго»	9055	34629	117234
Всего	**36101**	**59589**	**453137**

Как видно из таблицы в настоящее время в сетевых предприятиях Приморского края в качестве расчетных счетчиков активной электроэнергии преимущественно используются индукционные однофазные счетчики класса точности 2,5, большая часть которых находится в эксплуатации более 10 лет. Вследствие естественных процессов старения происходит износ механической части индукционных счетчиков и торможение диска, что приводит к недоучету электроэнергии. Величина погрешности индукционных счетчиков часто превышает нормируемую величину, в некоторых случаях это превышение достигает более 10%, что приводит к значительному недоучету потребленной электроэнергии.

Согласно правилам устройства электроустановок допустимый класс точности расчетных счетчиков активной электроэнергии в сетевых предприятиях должен быть не более 2,0 (погрешность ± 2%).

В жилищно-коммунальном секторе программа замены приборов расчетного и технического учета класса 2,5 на 2,0 практически не ведется, что и отражают табличные данные – приборов учета класса 0,5-2,0 – 17,44%, а класса 2,5 – 82,56%.

В настоящее время необходима целевая программа замены устаревшего приборного парка на современные приборы учета с функциями дистанционного автоматического сбора данных.

Техническое состояние электрических сетей

Техническое состояние основных фондов предприятий коммунальной энергетики характеризуется значительным (более 67%) износом в связи с длительным (более 20 лет) сроком эксплуатации. В то же время, в связи с остановкой деятельности большей части крупных промышленных предприятий произошли изменения в структуре транспортировки электрической энергии, а именно:

- снижение коэффициентов загрузки силовых трансформаторов;
- увеличение протяженности и разветвленности питающих линий 0,4 кВ;
- смещение центров электрических нагрузок за счет более интенсивного развития жилищно-коммунального сектора, по сравнению с промышленностью;
- рост несимметрии загрузки фаз 0,4 кВ.

В жилищном секторе практически отсутствует контроль ***технических потерь электрической энергии в сетях 0,4 кВ*** – работы по их определению и снижению практически не ведутся. В то же время, в связи с возросшей энергоемкостью потребителей коммунально-бытового сектора наблюдается перегруженность питающих линий и, как следствие, рост нагрузочных потерь электрической энергии.

Для устранения отмеченных негативных факторов необходимо проведение ряда организационно-технических мероприятий, реализация которых (ввиду высокой финансовой стоимости) требует согласованного участия бюджетов всех уровней.

Энергоаудит предприятий

Разработка и внедрение энергосберегающих мероприятий на всех уровнях транспорта и потребления электрической энергии возможно только при четком представлении специалистами структуры электропотребления, проблем транспорта и резервах предприятий по энергосбережению. Получить такую четкую картину позволяет энергоаудит независимыми экспертами высокой квалификации.

Целью энергетических обследований предприятий является оценка энергетической эффективности процессов производства, транспорта и распределения электрической энергии, в том числе потребления на собственные нужды, определение энергосберегающего потенциала, разработка и обоснование последовательности организационных, технических и других мер, обеспечивающих экономически обоснованное повышение эффективности использования энергии.

Задачами энергетических обследований являются:

- определение нормативного и фактического количеств потребления электроэнергии и выявление нормативного энергосберегающего потенциала в натуральном и денежном выражениях для обеспечения обоснования статей затрат, включаемых в себестоимость электроэнергии и услуг энергоснабжающих предприятий; выявление внутренних и внешних причин несоответствия фактического потребления нормативным значениям;
- определение теоретически возможного потенциала энергосбережения в натуральном и денежном выражениях для оценки эффективности инвестиционных проектов и проектов технического перевооружения;
- разработка технически и экономически обоснованных организационно-технических мероприятий, направленных на повышение энергетической эффективности, с оценкой объемов финансирования для их реализации, сроков окупаемости, способов возврата денежных средств;
- натурное определение (подтверждение) эффективности реализованных энергосберегающих мероприятий.

Проведенные частичные обследования ряда предприятий края Госэнергонадзором с привлечением специалистов кафедры Электроэнергетика ДВГТУ, позволили выявить неудовлетворительное состояние систем транспорта электрической энергии и показали актуальность проведения подобных работ в полном объеме.

Основные направления повышения эффективности транспорта и потребления электрической энергии

В жилищно-коммунальном секторе необходимо широкое стимулирование использования энергосберегающих мероприятий, а именно:

- использование современных источников освещения с пониженным электропотреблением;
- использование автоматических систем включения и отключения освещения по необходимости;
- применение современных бытовых приборов постоянного включения или с длительных рабочим режимом (холодильники, электронагреватели, стиральные машины, кондиционеры и т.п.) с пониженным электропотреблением;
- стимулирование использования зонных тарифов на электроэнергию при использовании бытовых приборов большой мощности с длительным режимом работы (электронагреватели, стиральные машины и т.п.) в ночное время;
- выравнивание загрузки фаз и оптимизация токовой загрузки линий электропередачи во внутридомовых сетях и т.д.

В связи с этим, первоочередным направлением энергосберегающей деятельности в жилищно-коммунальном хозяйстве является совершенствование системы учета электропотребления с доведением ее параметров до нормативного уровня.

Актуальность этого направления обусловлена следующими причинами:

1. Недоучет использованной электроэнергии ведет к недополучению электроснабжающими предприятиями средств за поставленную продукцию. Совершенствование системы учета позволит снизить темпы роста тарифов на электроэнергию за счет улучшения собираемости средств и увеличения доходов электроснабжающих предприятий.
2. Основным потребителем электроэнергии в жилищно-коммунальном хозяйстве является население и на уровне квартир затруднено целенаправленное внедрение энергосберегающих мероприятий извне. Основным стимулом энергосбережения в этой сфере являются финансовые затраты населения на коммунальные платежи. Полный учет электропотребления позволит потребителю четко представлять объемы использования электроэнергии и внедрять энергосберегающие мероприятия на коммунальном уровне для снижения расходов на оплату электроэнергии.
3. Одной из причин коммерческих потерь является несвоевременность платежей за потребленную электроэнергию. Современная система учета (в перспективе АСКУЭ) позволит ускорить и облегчить процедуру сбора информации о электропотреблении и, соответственно, облегчить и ускорить проведение платежей населением.
4. Использование многозонных приборов учета позволит потребителю гибко регулировать режим электропотребления и снизить затраты на электроэнергию в коммунальных платежах.

УДК 621.311.019

В.И. Виштибеев, А.В. Виштибеев, доценты, канд. техн. наук
Новосибирский Государственный Технический Университет

Обеспечение надежного электроснабжения в воздушных сетях 6-35 кВ

Рассмотрены дуговые перенапряжения и феррорезонансные процессы в воздушных сетях 6–35 кВ. Показана необходимость перевода сетей в режим резистивно-заземленной нейтрали. Даны рекомендации по выбору величины сопротивления резистора и его энергетических характеристик. Предложена методика оценки чувствительности защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). Рассмотрен вопрос допустимого времени существования ОЗЗ.
дуговые перенапряжения, феррорезонансные процессы, энергетические характеристики резистора, допустимое время существования замыкания на землю

В настоящее время все большее применение находят распределительные сети средних классов напряжения, содержащие в своем составе преимущественно двухцепные воздушные линии (ВЛ). Наличие двухцепных ВЛ вносит дополнительные требования к режимам и схемам эксплуатации таких сетей с точки зрения обеспечения их надежной эксплуатации.

При выборе оптимального режима работы в воздушных сетях, содержащих двухцепные линии, необходимо учитывать особенности, которые обусловлены электромагнитной связью между двумя цепями:

1. Невозможность применения в этих сетях дугогасящих реакторов (ДГР) для компенсации емкостных токов в режиме однофазного замыкания на землю ОЗЗ. Это обусловлено тем, что на нейтрали неповрежденной секции в режиме ОЗЗ появляется напряжение нулевой последовательности $3U_0$ [1].
2. Классическая формула В.Петерсена $R_{NB} \le 1/3\omega C_\Phi$ для определения верхнего предела величины сопротивления резистора в нейтрали справедлива только для одноцепных линий.

Первое, из отмеченных выше обстоятельств, предопределяет применение резистивного заземления нейтрали, как единственного способа исключения всех нежелательных последствий, вызываемых ОЗЗ в сетях 6-35 кВ, содержащих двухцепные ВЛ. Второе - необходимость учета межцепных емкостей.

Перенапряжения

Верхний предел величины сопротивления резисторов в воздушных сетях 6-35 кВ выбирается исходя из требования ограничения *дуговых перенапряжений* до уровня, безопасного для изоляции электрооборудования – (2-2.5)$U_{\Phi max}$. На рис. 1 приведена схема замещения двухцепной ВЛ для определения верхнего предела величины сопротивления резистора.

Наиболее опасные повторные зажигания дуги происходят за время, равное половине периода промышленной частоты. Величину резистора при которой емкость сети к моменту времени (0.01 с) полностью разрядится можно определить из следующих соотношений:

$$T = 2(R_{N1} + R_{N2})(\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_{12}); \quad C_1 = C_2 = C_1,\ R_{N1} = R_{N2} = R_N;$$

$$T = 2R_N(\frac{C_1}{2} + C_{12}) = R_N(C_1 + 2C_{12}) = R_N C_1(1 + \frac{2C_{12}}{C_1}) = R_N C_1(1 + 2\eta)$$

© В.И. Виштибеев, А.В. Виштибеев. 2004

где C_1, R_1 и C_2, R_2 - суммарная емкость и сопротивления резистора, присоединенных к первой и второй секциям шин, соответственно;

$\eta = C_{12} / C_1$, C_{12} - межцепная емкость.

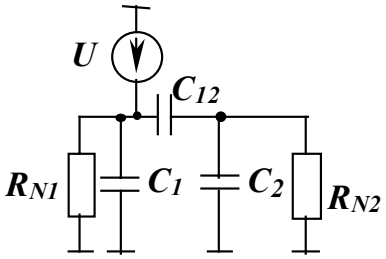


Рисунок 1 - Схема замещения двухцепной ВЛ для определения верхнего предела величины сопротивления резистора

$$T = R_N C_1(1+2\eta); \quad 0.01 = 3R_N \cdot 3C_1(1+2\eta) = 9R_N C_1(1+2\eta);$$

$$R_N = \frac{0.01}{9C_1(1+2\eta)} = \frac{0.01\cdot\omega}{9C_1(1+2\eta)\cdot\omega} = \frac{3.14}{9\omega C_1(1+2\eta)} = \frac{1}{3\omega C_1(1+2\eta)};$$

$$C_1 = C_A + C_B + C_C = C;$$

Таким образом, $R_N \le 1/3\omega C_\phi(1+2\eta)$,

где $\eta = C_{мц}/C_ф$ ($C_{мц}$ - межцепная емкость).

Тогда, например, для двухцепных ВЛ 35 кВ $\eta \approx 0.808$ нФ/3.62 нФ=0.22

$$R_N \le 1/4.5\omega C_\phi .$$

Из этого выражения следует, что в случае двухцепных ВЛ требуемая величина сопротивления резистора уменьшается в 1.5 раза.

В двухцепных линиях с двухсторонним питанием, в результате наложения электромагнитных волн, возникающих при переходных процессах, могут возникать перенапряжения, превышающие $4U_{Фmax}$, в то время, как кратность перенапряжений на поврежденной фазе, определяемое условиями гашения дуги, не превышает $2U_{Фmax}$.

В табл. 1 показано влияние межцепных и междуфазных емкостей на величины перенапряжений при первом и втором зажиганиях дуги.

Таблица 1 - Влияние междуфазных и межцепных емкостей на перенапряжения в процессе ОДЗ на двухцепных ВЛ (угол зажигания ψ_A=0°, $r_{дуги}$=1 Ом)

Условия протекания процесса	$U_{max}/U_{Фmax}$	$C_{фф}=0$ $C_{мц}=0$	$C_{фф}\neq0$ $C_{мц}=0$	$C_{фф}=0$ $C_{мц}\neq0$	$C_{фф}\neq0$ $C_{мц}\neq0$
Первое зажигание дуги. Гашение дуги не происходит	U_{Bm1}	2.04	2.03	2.05	2.04
	U_{Cm1}	2.58	2.40	2.60	2.42
	U_{N1m1}	1.64	1.61	1.62	1.60
	U_{N2m1}	0.22	0.22	0.48	0.48
Первое и второе зажигания дуги. Гашение происходит при первом прохождении тока в дуге через нулевое значение	U_{Bm1}	2.15	2.01	3.47	2.33
	U_{Bm2}	4.27	3.32	3.02	2.95
	U_{Cm1}	3.16	2.98	3.22	3.25
	U_{Cm2}	5.11	4.56	4.04	3.75
	U_{N1m1}	1.95	1.90	1.94	3.41
	U_{N1m2}	3.80	3.24	2.67	2.58
	U_{N2m1}	0.22	0.22	0.48	0.48
	U_{N2m2}	0.07	0.07	0.83	0.83

Примечания: цифры 1 и 2 в индексной части переменных отвечают максимумам напряжений на фазах при первом и втором зажиганиях дуги, соответственно; в таблице выделена строка, отвечающим максимальным перенапряжениям на неповрежденных фазах *B* и *C* при втором зажигании дуги.

Из табл. 1 видно, что межцепные емкости в двухцепных ВЛ 35 кВ приводят к уменьшению максимумов перенапряжений при ОДЗ примерно на 8%; междуфазные – ~28%. При одновременном учете межцепных и междуфазных емкостей максимумы перенапряжений при ОДЗ уменьшаются примерно на 36%. Следовательно, для достоверного моделирования процессов при ОДЗ и выборе оптимальной величины сопротивления резистора, в сетях, содержащих двухцепные ВЛ, необходимо учитывать не только междуфазные но и межцепные емкости. Межцепные емкости в большей степени сказываются на параметрах режима ОЗЗ неповрежденной цепи, примыкающей к поврежденной секции шин, а также на цепях ВЛ, питаемых от неповрежденной системы шин. Отношение же токов в поврежденной и неповрежденной цепях остается примерно неизменным.

При ОЗЗ и в нормальном режиме работы в сетях с изолированной нейтралью наблюдаются феррорезонансные процессы, опасные для присоединенных к сети трансформаторов напряжения для контроля изоляции (ТНКИ) и другого электрооборудования. ТНКИ повреждаются за счет возникающих при гашении дуги феррорезонансных колебаний, обусловленных насыщением магнитопроводов ТНКИ при значительных повышениях напряжения на нем. Феррорезонансные колебания сопровождаются появлением токов в обмотках высокого напряжения ТН, зачастую значительно превышающих допустимые по их тепловой устойчивости. Так, для НТМИ-6 и НТМИ-10 опасными являются длительные токи, превышающие 0.2-0.3 А; допустимый ток для ЗНОМ–35 составляет ~0.13 А [2]. Скорость протекания феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью исключает возможность предотвращения последствий этих опасных процессов с помощью средств релейной защиты.

При оснащении нейтралей воздушных сетей 6-35 кВ резисторами, величина сопротивления которых выбрана исходя из требования разряда емкости сети за время порядка 0.01 с ($R_N \le 1/3\omega C_\Phi(1+2\eta)$), опасных установившихся феррорезонансных явлений, приводящих к нарушению теплового баланса ТН, не наблюдается. Перенапряжения не превзойдут уровня, ~$2.5U_{\Phi max}$, который имеет место при первом зажигании дуги.

При оснащении нейтралей этих сетей резисторами токи в обмотке ВН ТН в течение «переходного» феррорезонанса не превышают 0.3-3 А.

Алгоритмы построения и методика оценки чувствительности релейной защиты от ОЗЗ

Нижний предел величины сопротивления резистора зависит от условий обеспечения построения селективной и чувствительной релейной защиты (РЗ) от ОЗЗ и времени эксплуатации резистора в режиме однофазного замыкания на землю. В воздушных сетях этот предел целесообразно выбирать исходя из условия селективного срабатывания ненаправленной токовой защиты (с учетом соотношения между собственным емкостным током и током небаланса в трансформаторах тока).

Таким образом, величину сопротивления резистора в воздушных сетях следует выбирать в диапазоне:

$$f(I_{НБ}, I_C) \le R_N \le 1/3\omega C_\Phi(1+2\eta).$$

В релейной защите воздушных сетей в качестве источника токов нулевой последовательности используется трехтрансформаторный фильтр нулевой последовательности с применением трансформаторов тока, встроенных в выключатели. В нулевых проводах таких фильтров протекают значительные токи небаланса, величина которых, в ряде случаев, сопоставима с токами ОЗЗ. Это может не позволить добиться необходимой селективности и чувствительности релейной защиты, при величине резистора в нейтрали $R_N=1/3\omega C_Ф(1+2\eta)$. В этих случаях для достижения необходимой чувствительности необходимо уменьшать величину резистора, выбранную из условия $R_N=1/3\omega C_Ф(1+2\eta)$ [3].

Алгоритмы функционирования РЗ от ОЗЗ в каждом конкретном случае будут определяться той величиной переходного сопротивления в месте ОЗЗ, на которую эта защита должна реагировать. Поэтому, на наш взгляд, чувствительность РЗ от ОЗЗ целесообразно оценивать не общепринятым коэффициентом чувствительности, а величиной переходного сопротивления в месте замыкания, при котором защита ещё может «чувствовать» ОЗЗ.

Заземление нейтрали сети через резистор позволит создать условия для конструирования простой и надежной защиты от ОЗЗ, основанной на протекании активного тока в поврежденном фидере. Подбор величины сопротивления резистора в диапазоне, указанном выше, позволит добиться необходимой чувствительности РЗ.

Предлагаемая *методика оценки чувствительности защиты от ОЗЗ* [4,5] рассматривается как неотъемлемая часть комплекса мер по резистивному заземлению нейтрали и заключается в определении минимальной величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ, при котором защита еще "чувствует" ОЗЗ - $R_{З min}$:

1. Определить величину $R_{З min}$:

1.1. Задаться величиной переходного сопротивления $R_{З min}$, при которой защита еще реагирует на ОЗЗ;

1.2. При известном уровне срабатывания устройств сигнализации, реагирующих на появление напряжения нулевой последовательности в режиме изолированной нейтрали сети, определить предельное значение переходного сопротивления в месте ОЗЗ – $R_{З min}$. Базовая величина $R_{З min}$ в конкретном регионе будет определяться подстанцией, к которой примыкает наиболее протяженная сеть [6].

2. Исходя из максимального рабочего тока по методике [7] рассчитать ток небаланса.

3. Рассчитать уставки срабатывания токовой и токовой направленной защиты (прямые 1 и 2, рис. 2).

4. Построить зависимость тока в поврежденной линии от переходного сопротивления в месте ОЗЗ - $3I_{0ПВ}=f(R_З)$ – кривая 3, рис. 2.

5. По графику определить реальное переходное сопротивление, на которое реагирует токовая и токовая направленная защита ($R_{ЗТОК}$,$R_{ЗНАПР}$).

6. Сравнив желаемое переходное сопротивление в месте ОЗЗ $R_{З min}$ (п.1) с реальным, полученным графическим путем, сделать вывод о чувствительности защиты.

Коэффициент чувствительности защиты определится как

$$k_ч = \frac{R_{З\ ТОК\ /\ НАПР}}{R_{З\min}},$$

где $R_{ЗТОК/НАПР}$ – переходное сопротивление, при котором срабатывает токовая или токовая направленная защита, установленная на конкретной подстанции в рассматриваемом регионе.

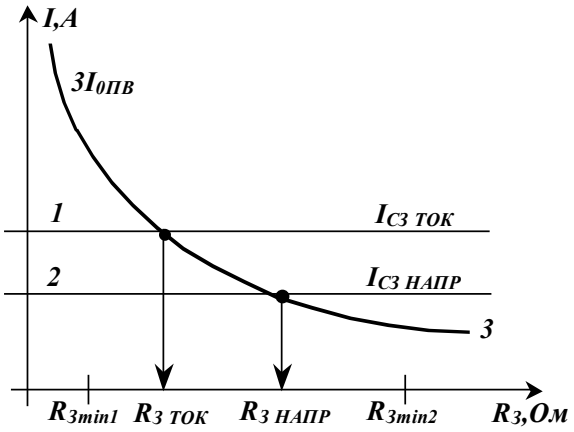


Рисунок 2 - К методике оценки чувствительности защит от ОЗЗ

Если $1 \le k_{Ч} \le 1.1$, то защита удовлетворяет необходимым требованиям. Именно такой коэффициент чувствительности обеспечивает минимальное увеличение тока ОЗЗ.

Необходимо отметить, что *при $k_Ч >> 1$ величина переходного сопротивления, при котором релейная защита отключит поврежденный фидер, будет неоправданно больше R_{3min}*. Это, в свою очередь, приводит к увеличению тока ОЗЗ (при резистивном заземлении нейтрали) и к ухудшению условий электробезопасности.

На наш взгляд, максимальные значения токов небаланса в практике расчетов релейной защиты, определяемые по методике [7], оказываются значительно большими, чем на практике. Это подтверждается экспериментами, которые проводились сотрудниками Новосибирского государственного технического университета в Ноябрьских и Нефтеюганских электрических сетях Тюменьэнерго [8]. Уставки токовых защит, выбранные с использованием методики [7] получаются завышенными. Таким образом, окончательный выбор в пользу токовой или токовой направленной защиты должен производиться при практическом внедрении резистивного заземления нейтрали с учетом условий реального объекта.

Длительность эксплуатации резистора в режиме Замыкания на землю

Можно выделить два основных подхода к выбору длительности эксплуатации резистора для заземления нейтрали и величины его сопротивления: высокомные, рассчитанные на длительную эксплуатацию в режиме ОЗЗ, резисторы (до 6-8 часов); низкоомные, отключаемы резисторы, не рассчитанные на длительную эксплуатацию в режиме ОЗЗ (до 3 с).

Отметим следующее, внесенное в ПУЭ (введены в действие с 01 января 2003г.) дополнение, гласящее, 1.2.16: *"...работа электрических сетей напряжением 3-35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасительный реактор или резистор…*", призванное повысить электробезопасность и надежность эксплуатации этих сетей только усугубило положение. Все внимание переключилось на высокоомные (так называемые неотключаемые резисторы), рассчитанные на длительную работу в режиме ОЗЗ - до 6-8 часов.

Реально же внедрение и эффективное использование резистивного заземления нейтрали - для повышения уровня надежности и электробезопасности, возможно только при минимизации времени существования однофазного замыкания на землю. В противном случае мы увеличиваем ток ОЗЗ, минимум в $\sqrt{2}$ раз и если поврежденный элемент не отключается, то электробезопасность такой сети снижается (даже по

сравнению с режимом изолированной нейтрали). На наш, взгляд необходимо уменьшать время существования ОЗЗ в рассматриваемых сетях, что позволит повысить их надежность и электробезопасность. Но это возможно только при четко сформулированных требованиях к времени эксплуатации сети в режиме ОЗЗ, согласованно отраженных во всех нормативных документах.

Подчеркнем, что в воздушных сетях, содержащих двухцепные ВЛ, есть все предпосылки для внедрения резистивного заземления нейтрали, так как наличие двух цепей позволит *отключать присоединение с ОЗЗ, без нарушения электроснабжения потребителей*.

Энергетические характеристики резисторов

Мощность резисторов определяется как $I^2 \cdot R$, а их энергетические характеристики определяются временем существования ОЗЗ.

Например, в случае немедленного отключения поврежденного присоединения релейной защитой, энергетические характеристики определяются временем действия релейной защиты (резервной ступени) от ОЗЗ, и составляют:

- на напряжении 6 кВ – 0.1–0.45 кВт и 0.2–1.3 кДж ($t \approx 3$ с);
- на напряжении 10 кВ – 0.2–1.2 кВт и 0.6–3.5 кДж ($t \approx 3$ с);
- на напряжении 35 кВ – 6–102 кВт и 19–306 кДж ($t \approx 3$ с).

Выводы и практические рекомендации

1. Величину сопротивления резистора в воздушных сетях следует выбирать в диапазоне: $f(I_{НБ},\ I_C) \le R_N \le 1/3\omega C_Ф(1+2\eta)$, что позволит с заданной степенью надежности решать задачу гашения дуги при ОЗЗ и конструировать селективную и надежную релейную защиту.
2. Для достоверного моделирования процессов при ОДЗ и выбора оптимальной величины сопротивления резистора, в сетях, содержащих двухцепные ВЛ, необходим учет как междуфазных, так и межцепных емкостей.
3. Резистивное заземление нейтрали позволяет избежать установившихся феррорезонансных процессов, характерных для сетей небольшой протяженности при их оснащении ТН типов ЗНОМ, ЗНОЛ, НТМИ. «Переходный» феррорезонанс характеризуется относительно небольшими токами, не представляющими опасности для обмоток ВН ТН.
4. Предложенная методика оценки чувствительности защит от ОЗЗ позволяет выполнить качественный анализ различных вариантов защиты и выбрать наиболее приемлемый.
5. При создании условий для отключения поврежденного присоединения, оно должно быть немедленно отключено релейной защитой: энергетические характеристики резистора должны быть рассчитаны на кратковременное воздействие токов ОЗЗ в течение 1.5-3 с. В случаях, когда допускается эксплуатация сети с ОЗЗ, - эти случаи должны быть четко сформулированы во всех нормативных документах, энергетические характеристики резистора должны быть рассчитаны на более долговременное воздействие токов ОЗЗ (время существования ОЗЗ должно быть сведено к минимуму).
6. В воздушных сетях, содержащих двухцепные ВЛ, необходимо и целесообразно внедрять резистивное заземление нейтрали, так как наличие двух цепей позволит отключать присоединение с ОЗЗ, без нарушения электроснабжения потребителей.

Список литературы

1. Кадомская К.П., Тихонов А.А. Режимы замыкания на землю в сети, содержащей двухцепные воздушные линии // Промышленная энергетика.–1991. – №12, С. 15–18.
2. Заболотников А.П., Кадомская К.П., Тихонов А.А. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6…35 кВ: монография / Новосиб.гос.техн.ун–т. – Новосибирск, 1993. –158с.
3. Виштибеев А.В., Кадомская К.П., Максимов Б.К. Влияние резистивного заземления нейтрали на параметры режима замыкания на землю в сетях 35 кВ, содержащих двухцепные линии электропередачи // Электрические станции, № 3, 1999. – С. 49–53.
4. Alexey V. Wishtibeev. Method of an Estimation of Protection Sensitivity Against the Single-Phase Connections in Overhaed Networks. Conference Proceeding First International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering Ch. Juvarli TPE-2002. 23-25 April, 2002, Baku, Azerbaijan. P. 131-133.
5. Виштибеев А.В. Методика оценки чувствительности защит от однофазных замыканий на землю в воздушных сетях // Электро, №6, 2002. - С. 34-35.
6. Виштибеев А.В., Кадомская К.П. О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6-35 кВ // Энергетик, № 3, 2001.– С. 33-34.
7. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 12: Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110-500 кВ. Расчеты. - М.: Энергия, 1990.
8. Виштибеев В.И., Виштибеев А.В., Дубровский В.В. К вопросу об учете токов небаланса при выборе уставок токовых защит от ОЗЗ. Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ. Труды Второй Всероссийской научно-технической конференции. Новосибирск, 2002. С. 81-83.
9. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: ЗАО "Энергосервис". Госэнергонадзор Минэнерго России, 2003. - 392 с.
10. Назаров В.В. Защита электрических сетей от однофазных замыканий. Киев: Либідь, 1992. - 124 с.

УДК 621.316.9

А.В. Виштибеев, доц., канд. техн. наук
Новосибирский Государственный Технический Университет

Об электромагнитной совместимости устройств электротехнических комплексов

Рассмотрены виды и уровни перенапряжений, воздействующих на изоляцию. Показано, что вопросы электромагнитной совместимости должны решаться совместно с вопросами режима заземления нейтрали. Изложены принципы заземления нейтрали, позволяющие выбрать оптимальный вариант.
электромагнитная совместимость, уровни перенапряжений, ограничение перенапряжений, системный подход, режимы заземления нейтрали

Согласно [1] характерной особенностью современного состояния электрооборудования для передачи и распределения электрической энергии напряжением 6-35 кВ на электротехнических комплексах является обеспечение электромагнитной совместимости уровня изоляции, параметров энергозащитных устройств, устройств релейной защиты и автоматики. Решение данной задачи становится особенно актуальной в связи со старением действующего оборудования, широким внедрением новой коммутационной аппаратуры, возрастанием доли нелинейных потребителей электроэнергии, постоянно усложняющейся конфигурацией и увеличением мощности сетей, внедрением новых современных средств распределения электроэнергии, растущими требованиями к бесперебойности электроснабжения потребителей, к надежности эксплуатации и электробезопасности сетей, к устройствам ограничения перенапряжений, к селективности и помехоустойчивости, чувствительности и быстродействию устройств релейной защиты и автоматики.

Как известно, устройства электротехнических комплексов подвергаются воздействию грозовых, внутренних и временных перенапряжений.

Главной опасностью для высоковольтного оборудования при *грозовых* разрядах являются перенапряжения, возникающие при протекании импульсов тока молнии по частям оборудования, пораженного молнией. Эти перенапряжения могут вызывать перекрытие наружной изоляции или повреждение внутренней изоляции, дугу короткого замыкания, аварийное отключение поврежденного участка сети и, как следствие, перерыв в электроснабжении потребителей. Последствия грозового разряда могут быть различными в зависимости от места попадания молнии, класса изоляции электроустановки и принятых мер защиты от грозовых поражений.

Виды и величины *внутренних перенапряжений* приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Виды и уровни внутренних перенапряжений, $U_{max}/U_{Фmax}$

Включение воздушных и кабельных линий	3.2-3.5
Отключение воздушных и кабельных линий	4.0-4.3
Отключение ненагруженных трансформаторов	5.0-6.3
Отключение двойного замыкания на землю	3.1-3.3
Отключение двухфазного короткого замыкания	2.0-3.1
Неодновременное включение фаз при пуске электродвигателей	3.0-3.5
Включение электродвигателей при АВР или АПВ	3.9-4.2
Отключение электродвигателей	4.0-6.2

© А.В. Виштибеев. 2004

Коммутация нагрузки вакуумными выключателями	2.5-7.0
Дуговые замыкания на землю	2.3-3.5
Резонансные повышения напряжения (феррорезонансные колебания)	2.0-2.7

Как видно из табл. 1, максимальные уровни внутренних перенапряжений имеют место при коммутации нагрузки вакуумными выключателями, а также при отключении электродвигателей и ненагруженных трансформаторов.

Согласно ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» в электротехнических комплексах может иметь место в среднем за год около 30 *временных перенапряжений* со следующими параметрами:

- при длительности временного перенапряжения до 1с, коэффициент временного перенапряжения – 1.47 о.е.;
- при длительности временного перенапряжения до 20с, коэффициент временного перенапряжения – 1.31 о.е.;
- при длительность временного перенапряжения до 60с, коэффициент временного перенапряжения – 1.15 о.е.

Невыполнение требований данного ГОСТ неминуемо приводит к выходу из строя ограничителей перенапряжений (ОПН).

Сравнительный анализ фактического и выдерживаемого уровней перенапряжений, воздействующих на изоляцию электрооборудования электрических сетей 6-35 кВ, позволяет сделать вывод о необходимости ограничения величин грозовых, внутренних и временных перенапряжений с применением защитных аппаратов, устройств релейной защиты и эффективного заземления нейтрали.

Именно режим заземления нейтрали является определяющим для решения вопросов электромагнитной совместимости.

Во многих публикациях [2-6] показаны существенные недостатки режима изолированной нейтрали и нейтрали, заземленной через дугогасительный реактор (ДГР), и обоснована необходимость перевода этих сетей в режим резистивно-заземленной нейтрали. В [7,8] показывается, что только на основе системного подхода к выбору режима заземления нейтрали можно повысить надежность и электробезопасность сетей 6-35 кВ и эффективно решать вопросы электромагнитной совместимости. А именно, необходимо взаимосвязано решать 3 задачи, которые в настоящее время чаще всего решаются по отдельности.

1. Полностью ликвидировать феррорезонансные процессы и снизить кратности дуговых перенапряжений до (2.0-2.5)$U_{Фmax}$, - гарантированно локализовать однофазные замыкания, не позволив им развиться в более серьезные аварии.

2. Создать условия для реализации надежной и селективной защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

3. Определить необходимое время эксплуатации сети в режиме ОЗЗ.

Ограничение перенапряжений

В некомпенсированных сетях с *изолированной нейтралью* существует большая вероятность возникновения перемежающейся дуги (60-80% от всех замыканий на землю). Независимо от причины возникновения перемежающегося замыкания на землю и характера процесса его протекания, оно неизбежно вызывает повышение напряжений в сети. *Особо подчеркнем, что перемежающиеся дуги могут возникать в сетях с изолированной нейтралью при любых токах замыкания на землю.* Наибольшие перенапряжения могут возникать в электрической сети не позднее, чем через 0.04 секунды с момента появления ОЗЗ. В этой связи следует вывод, что *нельзя с помощью*

современных средств релейной защиты и автоматики предотвратить появление при ОЗЗ опасных перенапряжений. Реально можно рассчитывать на отключение, в общем виде любого замыкания, за время не менее чем (0.06-0.07) с.

Кроме того, при ОЗЗ и в нормальном режиме работы, в сетях с изолированной нейтралью наблюдаются феррорезонансные процессы, опасные для присоединенных к сети трансформаторов напряжения и другого электрооборудования. Следствием дуговых замыканий или феррорезонансных процессов очень часто является их переход в двойные или многофазные замыкания.

Строго говоря, при изолированной нейтрали сети следовало бы повышать уровень ее изоляции, что, очевидно, практически нецелесообразно.

Применение *дугогасительных реакторов* (ДГР) позволяет ограничить перенапряжения до безопасного уровня. Чтобы применение *неуправляемых* ДГР было эффективным и оправданным необходимо обеспечить по крайней мере три условия: идеально симметрировать сеть; автоматизировать подстройку индуктивности ДГР, как в нормальном режиме, так и в режиме ОЗЗ, к изменяющимся в широких пределах параметрам сети; обеспечить компенсацию не только основной, но и высших гармонических составляющих токов ОЗЗ. При невыполнении этих условий неминуемо будет наблюдаться высокая аварийность сетей в основном из-за многоместных повреждений при ОДЗ. Практика эксплуатации показывает, что эти условия наиболее полно можно обеспечить только в кабельных сетях с высоким уровнем эксплуатации, например, на электрических станциях. В городских сетях требуемая компенсация встречается реже, а в распределительных сетях с воздушными линиями практически отсутствует. Задача идеальной (в определенном смысле этого слова) компенсации емкостного тока ОЗЗ имеет в общем случае только теоретическое решение, причем не одно.

Что же касается *управляемых* ДГР (УАРК, РУОМ), то они эффективно работают только в комплексе с микропроцессорной системой управления (достаточно сложной и дорогостоящей). Кроме того, в настоящее время, для несимметричных сетей системы автокомпенсации до сих пор находятся в стадии испытаний отдельных образцов. Это связано с тем, что резонансная настройка входит в противоречие с требованием ПТЭ о том, чтобы напряжение смещения нейтрали не превышала 15% (в некоторых режимах возможно возникновение на нейтрали сети напряжений до 1-8 кВ). Практически, сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю в большинстве своем имеют те же недостатки, которые характерны для режима изолированной нейтрали.

По нашему мнению, заземление нейтрали через ДГР является средством продления аварийного режима, достаточно сложно осуществимо технически и не всегда решает вопрос о селективном определении поврежденного фидера.

Перспективной альтернативой режиму изолированной нейтрали и нейтрали, заземленной через ДГР, является *резистивное заземление нейтрали,* которое позволяет снизить кратность дуговых перенапряжений до (2.0-2.5)$U_{\Phi max}$ и избежать опасных феррорезонансных процессов.

Кроме того, в случае установки резистора в нейтрали сети облегчаются требования к энергетическим характеристикам ограничителей перенапряжений, устанавливаемых на присоединениях для защиты изоляции двигателей от перенапряжений и к сопротивлениям *RC*-цепочек [9].

В табл. 2 приведены максимальные перенапряжения и энергия, поглощаемая резистором и ОПН для трех случаев:

- ОДЗ в схеме с ОПН;
- ОДЗ в схеме с резистором в нейтрали генератора;
- ОДЗ в схеме с ОПН и резистором в нейтрали генератора.

Таблица 2 - Перенапряжения и энергия, поглощаемые в процессе ОДЗ

Устройство защиты	$U^{(2)}_{max}/U_{\Phi max}$, о.е.	$W(R_N)$, кДж	W(ОПН), кДж
ОПН	2.62	0	0.74
Резистор	2.21	1.09	0
ОПН и резистор	2.2	1.07	0.33

Из табл. 2 видно, что в случае установки ОПН с опорной точкой ВАХ по току I_0=300 А энергия, поглощаемая в варисторах ОПН при одном повторном зажигании дуги составляет 0.74 кДж. Если принять с запасом, что повторные зажигания будут наблюдаться в течение всего процесса ОДЗ (порядка 0.5 с), то суммарная поглощаемая энергия составит 0.74·50=37 кДж. Удельная поглощаемая энергия будет 37/15.75=2.35 кДж/кВ U_c (U_c - длительно допустимое напряжение на аппарате). Выпускаемые в настоящее время аппараты типа ОПН характеризуются $W_{уд}$≅4 кДж/кВ U_c. Следовательно, энергия, поглощаемая в ОПН при ОДЗ, не превышает допустимых значений. Энергия, поглощаемая резистором в процессе ОДЗ, составляет 1.09 кДж, максимальные перенапряжения на неповрежденной фазе снижаются (по сравнению с установкой в сети генераторного напряжения ОПН) в 1.18 раз. При установке и ОПН и резистора перенапряжения на неповрежденной фазе минимальные. Энергия, поглощаемая резистором, составляет 1.07 кДж, энергия, поглощаемая в варисторах ОПН – 0.33 кДж, то есть снижается в 2.24 раза по сравнению со случаем отсутствия резистора в нейтрали и установкой в сети генераторного напряжения ОПН. Таким образом, оснащение нейтрали сети резистором существенно снижает требования к энергетическим характеристикам ОПН, устанавливаемым на стороне низшего напряжения силового трансформатора блока. При изолированной нейтрали блока эти характеристики должны обеспечивать поглощение варисторами ОПН энергии при длительном процессе повторных зажиганий дуги при ОДЗ. При установке в нейтрали резистора определяющими при выборе параметров ОПН будут служить кратковременные перенапряжения относительно небольшой кратности, возникающие при коммутациях генераторными выключателями блока, а также в случае связи трансформаторов блока с ОРУ с помощью воздушной перемычки – грозовые перенапряжения.

Алгоритмы построения релейной защиты

Подавляющее большинство защит от ОЗЗ, разработаны для режима *изолированной и заземленной через дугогасительный реактор нейтрали* в предположении длительной эксплуатации сети с ОЗЗ. При таком режиме нейтрали построение релейной защиты от ОЗЗ в *воздушных сетях* затрудняется значительными величинами токов небаланса. Поэтому, несмотря на большое количество технических решений по защите фидеров от однофазных замыканий [10] широкого применения в практике эксплуатации они не нашли. В практике эксплуатации воздушных сетей довольно часто имеют место случаи, когда "штатные" защиты от ОЗЗ, установленные в ячейках РУ, выводятся из работы обслуживающим персоналом в связи с вероятностью их неселективного действия. Другими словами, в настоящее время, практически во всех воздушных сетях 6-35 кВ единственным устройством автоматики, работающей при ОЗЗ, является устройство контроля изоляции.

Что касается *кабельных сетей и сетей генераторного напряжения* – принципиальных затруднений с построением релейной защиты от ОЗЗ не возникает. В *кабельных сетях* защита может быть организована на базе токовых или токовых направленных реле. В *сетях генераторного напряжения* в настоящее время релейная защита организована с использованием напряжения третьей гармоники на базе реле

БРЭ-1301.01. Кроме того, защита может быть выполнена с наложением на цепь статора постоянного тока; переменного тока; с использованием емкостного тока ОЗЗ.

Переход на режим *резистивно-заземленной нейтрали* позволит создать *простую* и надежную селективную защиту от однофазных замыканий, построенную на принципе появления активного тока в поврежденном фидере.

Длительность эксплуатации сети в режиме ОЗЗ

При наличии резервирования и селективных релейных защит, присоединение с ОЗЗ должно быть *немедленно* отключено. Тем самым исключается возникновение перемежающихся дуг, являющихся источником опасных перенапряжений и дальнейшее развитие аварии. К сожалению, такие условия обеспечиваются только в сети очень ответственных объектов, например, в сетях собственных нужд АЭС или крупных ТЭЦ. В этом случае длительность эксплуатации сети в режиме ОЗЗ определяется только быстродействием релейной защиты.

В большинстве сетей 6-35 кВ, к сожалению, отсутствуют условия для немедленного отключения поврежденного присоединения. В связи с необходимостью бесперебойного снабжения потребителей и невозможностью быстрого перевода на резервное питание допускается существование ОЗЗ. В этом случае время эксплуатации резистора в режиме ОЗЗ определяется временем, за которое обслуживающий персонал сможет определить место повреждения и устранить его, или создать временную схему электроснабжения без отключения потребителей. Еще раз подчеркнем, что согласно Правилам технической эксплуатации электроустановок потребителей *"к отысканию места замыкания персонал должен приступать немедленно и устранять повреждения в кратчайший срок"*.

В идеальном варианте время существования ОЗЗ должно ограничиваться следующим временным диапазоном: $t_{ОЗЗ} \leq t_{РЗ}$, где $t_{РЗ}$ - время отключения ОЗЗ, которое состоит из времени работы релейной защиты присоединения с учетом времени автоматического перевода потребителей на резервное питание.

К сожалению, в настоящее время, нормативные документы нечетко выделяют случаи, когда работа с ОЗЗ запрещается, и еще более нечетко формулируют требования к времени существования ОЗЗ. Кроме того, допускается отыскание поврежденного элемента поочередным отключением присоединений. Очевидно, что современное состояние защит сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю не удовлетворяет требованиям надежности эксплуатации и электробезопасности сетей (длительное существование ОЗЗ - до 6 часов), а также, селективности, помехоустойчивости, чувствительности и быстродействию. Поэтому нормативные документы, в которых сформулированы требования к режиму заземления нейтрали и защитам от ОЗЗ в сетях 6-35 кВ, нуждаются и исправлениях и дополнениях.

Выбор режима заземления нейтрали

Принципы заземления нейтрали, позволяющие выбрать оптимальный вариант сведены в табл. 3. В качестве основных параметров используются: ток ОЗЗ; условия выбора величины сопротивления резистора; время функционирования резистора в режиме ОЗЗ; энергетические характеристики резистора; алгоритмы построения релейной защиты.

Таблица 3 - Принципы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ

<table>
<tr><td colspan="4">Ток однофазного замыкания на землю</td></tr>
<tr><td>I<5 А</td><td>5<I<30 А</td><td>30<I<50 А</td><td>I>50 А</td></tr>
<tr><td colspan="3">Условия выбора величины сопротивления резистора</td><td></td></tr>
<tr><td>$R_N = \frac{U}{4I_{ОЗЗ}}$ - определяется созданием активного тока ОЗЗ, для слективного выявления поврежденного фидера</td><td colspan="2">Верхний предел: $R_N=1/3\omega C_Ф(1+2\eta)$
Нижний предел:
• для воздушных сетей: выбирается таким образом, чтобы селективно срабатывала токовая ненаправленная защита;
• для кабельных сетей (городские и сети СН) и сетей генераторного напряжения блоков генератор-трансформатор: выбирается таким образом, чтобы при ОЗЗ не срабатывала защита от междуфазных замыканий</td><td rowspan="11">Резистивное заземление нейтрали может применяться, если ток ОЗЗ не будет превышать ток междуфазного КЗ. Альтернатива – ДГР</td></tr>
<tr><td colspan="3">Величина сопротивления резистора и время эксплуатации резистора в режиме ОЗЗ</td></tr>
<tr><td>150-1000 Ом (1.5-3 сек)</td><td>100-400 Ом (1.5-3 сек)
500-10000 Ом (до 2 час)</td><td>100-400 Ом (1.5-3 сек)
500-10000 Ом (до 2 час)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Алгоритм построения релейной защиты</td></tr>
<tr><td>РЗ действует на отключение:
направленная (ненаправленная) токовая защита;
защита осуществляемая с использованием напряжения 3-ей гармоники</td><td>РЗ действует на отключение (100-400 Ом)
ненаправленная токовая защита с действием на отключение;
защита осуществляемая с использованием напряжения 3-ей гармоники
***
РЗ действует на сигнал (500-10000 Ом):
направленная (ненаправленная) токовая защита;
защита осуществляемая с использованием напряжения 3-ей гармоники</td><td>РЗ действует на отключение (100-400 Ом)
ненаправленная токовая защита с действием на отключение;
защита осуществляемая с использованием напряжения 3-ей гармоники
***
РЗ действует на сигнал (500-10000 Ом):
направленная (ненаправленная) токовая защита;
защита осуществляемая с использованием напряжения 3-ей гармоники</td></tr>
<tr><td colspan="3">Альтернатива резистивному заземлению нейтрали</td></tr>
<tr><td>-----</td><td>ДГР</td><td>ДГР</td></tr>
</table>

Вывод

Режим заземления нейтрали определяет многие важные показатели электрических сетей: уровень возможных перенапряжений в сети при замыканиях на землю, и, следовательно, запас прочности и стоимость изоляции, условия безопасности обслуживания, надежность электроснабжения потребителей, выполнение устройств селективной защиты или сигнализации от замыканий на землю и, наконец, электромагнитную совместимость любой электротехнической системы, то есть ее способность нормально функционировать вместе с другими техническими системами.

Поэтому, совершенствование режима нейтрали одна из важнейших и ответственных задач, направленная на на повышение технического уровня их эксплуатации, которая должна решаться комплексно.

Список литературы

1. ГОСТ Р 50397-92. Совместимость технических средств электромагнитная.
2. Виштибеев А.В. О необходимости перевода электрических сетей 6-35 кВ на режим резистивного заземления нейтрали. Научно-технический журнал Национальной Академии Наук Азербайджана "Проблемы энергетики", 2002, №3. Баку, Изд-во "Эльм". С. 17-24.
3. Виштибеев А.В., Кадомская К.П. О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6-35 кВ. // Энергетик, № 3, 2001.– С. 33-34.
4. Alexey V. Wishtibeev, Kira P. Kadomskaja. The Resistivity Grounding of Neutral in 6-35 kV Electrical Networks. Conference Proceeding First International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering Ch. Juvarli TPE-2002. 23-25 April 2002, Baku, Azerbaijan. P. 147-151
5. Назаров В.В. Защита электрических сетей от однофазных замыканий. Киев: Либідь, 1992. - 124 с.
6. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. Киев: Наукова думка, 1985. - 264 с.
7. Виштибеев А.В. Принципы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ для повышения надежности эксплуатации. Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования, Выпуск 1. «Технологии координации изоляции и эксплуатация современных технических средств от перенапряжений в сетях с изолированной и резонансно заземленной нейтралью»: Материалы международной научно-технической конференции, 31 марта-05 апреля 2003 года. С.-Петербург.: Изд-во ПЭИПК, 2003 г., 348 с., С. 118-127.
8. Виштибеев А.В. Системный подход к заземлению нейтрали сетей 6-35 кВ различного конструктивного исполнения и назначения // Науково-прикладний журнал «Технічна електродинаміка». Тематичний випуск. VII Міжнародна конференція «Проблеми сучасної електротехники», 7-10 червня 2004 р., Київ, Україна. У 7 частинах. Частина 4, с. 38-42.
9. Виштибеев А.В. Резистивное заземление нейтрали как средство облегчения условий эксплуатации ОПН и резисторов в RC-цепочках // Электро, № 4, 2003.– С. 15-19.
10. Бухтояров В.Ф., Маврицын А.М. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров. М.: Недра. 1986. - 183 с.
11. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: ЗАО "Энергосервис". Госэнергонадзор Минэнерго России, 2003. - 392 с.

УДК 621.313

А.Н. Артеменко
Кременчугский государственный политехнический университет

Исследование процесса самовозбуждения двигателя постоянного тока

В работе выполнено исследование динамического торможения с самовозбуждением двигателя постоянного тока применительно к большегрузным автомобилям БелАЗ. Рассмотрен и функционально описан лабораторный стенд, позволяющий исследовать характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.
самовозбуждение, кривая намагничивания, динамическое торможение, компьютеризированный измерительный комплекс, двигатель постоянного тока

Одним из важнейших звеньев технологической цепи открытых горных разработок является карьерный транспорт, так как почти половина всех стоимостных и трудовых ресурсов отрасли приходится на транспортирование горной массы. С ростом глубины карьеров возрастает роль автомобильного транспорта.

Энергосиловая установка большегрузного карьерного автосамосвала состоит из дизельного двигателя, являющегося источником энергии для всех систем и механизмов, на одном валу с которым находится генератор постоянного тока, обеспечивающий энергией тяговые электродвигатели и представляющий собой машину постоянного тока независимого возбуждения. Тяговые электродвигатели представляют собой машины постоянного тока последовательного возбуждения.

Тяговый электропривод предназначен для преобразования механической энергии, вырабатываемой дизельным двигателем, в электрическую, автоматического ее регулирования и обратного преобразования в механическую для привода ведущих колес автомобиля.

В настоящее время на большегрузных автомобилях БелАЗ в качестве вспомогательной тормозной системы используется система электрического торможения, работающая в режиме динамического торможения. При этом якоря тяговых электродвигателей отключены от генератора и замкнуты с помощью контакторов на индивидуальные тормозные резисторы. Система динамического торможения большегрузных автомобилей имеет ряд недостатков.

Альтернативой служебного торможения может стать торможение с самовозбуждением.

Способ динамического торможения с самовозбуждением широко применяется на практике, так как он не требует питания обмоток двигателя от сети, что является обязательным условием для схем аварийного торможения.

Для перехода в режим динамического торможения с самовозбуждением необходимо выполнить ряд условий.

Первым условием самовозбуждения является наличие остаточного потока такого знака, чтобы при данном направлении вращения ЭДС, наводимая остаточным потоком, вызвала ток возбуждения, увеличивающий поток двигателя. Если двигатель работал в двигательном режиме при $\omega > 0$, то его ЭДС в режиме торможения при $\omega > 0$ создает ток, направленный противоположно току якоря в предшествующем режиме. Этот ток, протекая по обмотке возбуждения, создает МДС, уменьшающую поток остаточного намагничивания, и самовозбуждение исключается. Если при этом

© А.Н. Артеменко. 2004

изменить направление вращения ($\omega < 0$), двигатель самовозбудится, поэтому характеристика на рис. 1 при $U_я = 0$ существует только в четвертом квадранте. Обеспечить торможение во втором квадранте можно, переключив либо выводы якоря, либо выводы обмотки возбуждения.

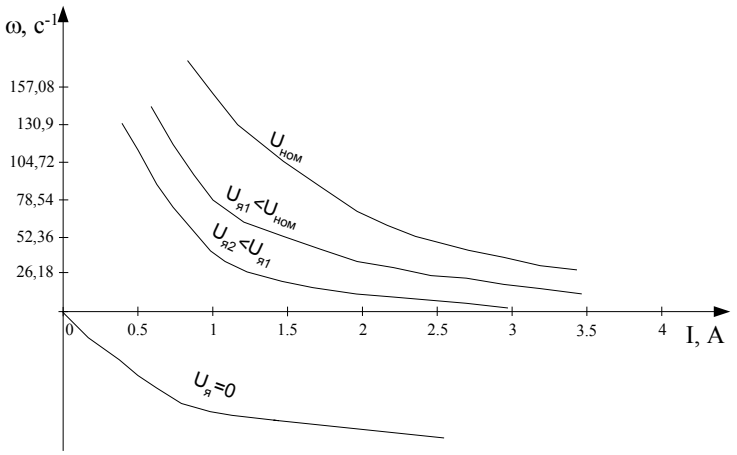


Рисунок 1 - Характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при различных напряжениях питания $U_я$

Далее приведен ряд зависимостей $E(I_я)$, соответствующих различной скорости движения якоря. Если воспользоваться кусочно-линейной аппроксимацией кривой намагничивания зависимости $E(I_я)$ приближенно линеаризуются, причем при $I_я > I_{гр}$ ЭДС принимается приближенно постоянной. На рис. 2, б. показана также прямая $I_я = f(E) = E / R_{я\Sigma}$.

Второе условие самовозбуждения поясняет рис. 2, б.

Известно, что при самовозбуждении $E(I_я) = I_я(E)$, и второе условие самовозбуждения графически выражается наличием точки пересечения этих характеристик. Это условие на рис. 2, б выполняется только при $\omega > \omega_2$, причем граничное значение скорости $\omega_{гр} \approx \omega_3$. Таким образом, самовозбуждение может наступить только после достижения скорости $\omega_{гр}$, при которой наклон линейной части характеристики $E(I_я)$ совпадает с наклоном прямой $I_я = E / R_{я\Sigma}$.

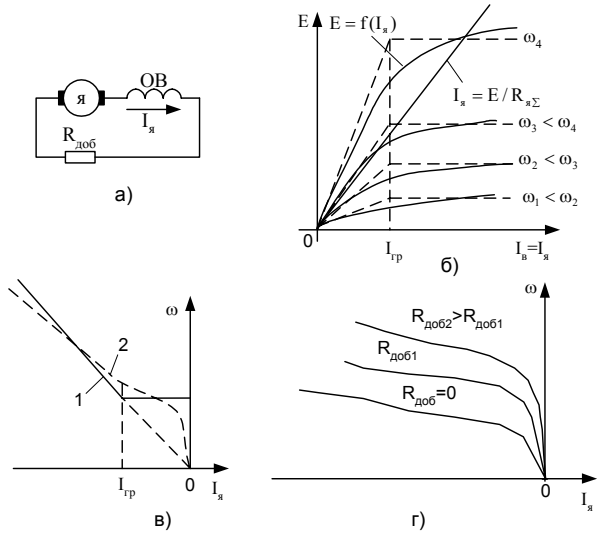


Рисунок 2 - Динамическое торможение с самовозбуждением двигателя с последовательным возбуждением

Следовательно, при увеличении суммарного сопротивления цепи якоря самовозбуждение наступает при более высоких скоростях $\omega_{гр}$. Изложенные соображения позволяют установить форму характеристики динамического торможения с самовозбуждением, показанную на рис. 2, в. При $\omega \le \omega_{гр}$ самовозбуждение отсутствует и $I_я \approx 0$. При $\omega = \omega_{гр}$ двигатель самовозбуждается, ток якоря при принятой аппроксимации возрастает до $I_я = I_{гр}$ и при дальнейшем увеличении скорости двигатель имеет линейную характеристику $\omega(I_я)$, соответствующую $\Phi = \Phi_{нас} \approx const$.

Поэтому при принятой идеализации электромеханическая характеристика при динамическом торможении с самовозбуждением имеет вид ломаной 1 на рис. 2, в. В связи с наличием остаточного потока $\Phi_{ост}$ ток при $\omega < \omega_{гр}$ несколько возрастает, а реальная форма кривой намагничивания приводит к дополнительным отклонениям фактической кривой $\omega(I_я)$ (кривая 2 на рис. 2, в) от приближенной кривой 1. Форма механической характеристики в этом режиме аналогична форме электромеханической характеристики 2. В этом можно убедиться, рассмотрев приведенные на рис. 2, г механические характеристики динамического торможения с самовозбуждением при различных добавочных сопротивлениях в цепи якоря.

Для исследования режима динамического торможения с самовозбуждением двигателя постоянного тока последовательного возбуждения был создан лабораторный стенд.

Лабораторный стенд содержит типовой корпус с лицевой панелью, на котором размещены измерительные приборы и органы управления, а также одну спарку, состоящую из двух электрических машин постоянного тока последовательного возбуждения с жестким соединением валов. Двигатели имеют одинаковые паспортные данные. Нагружение может осуществляться как одной из машин, так и механическим тормозом. Схема лабораторного стенда представлена на рис. 3.

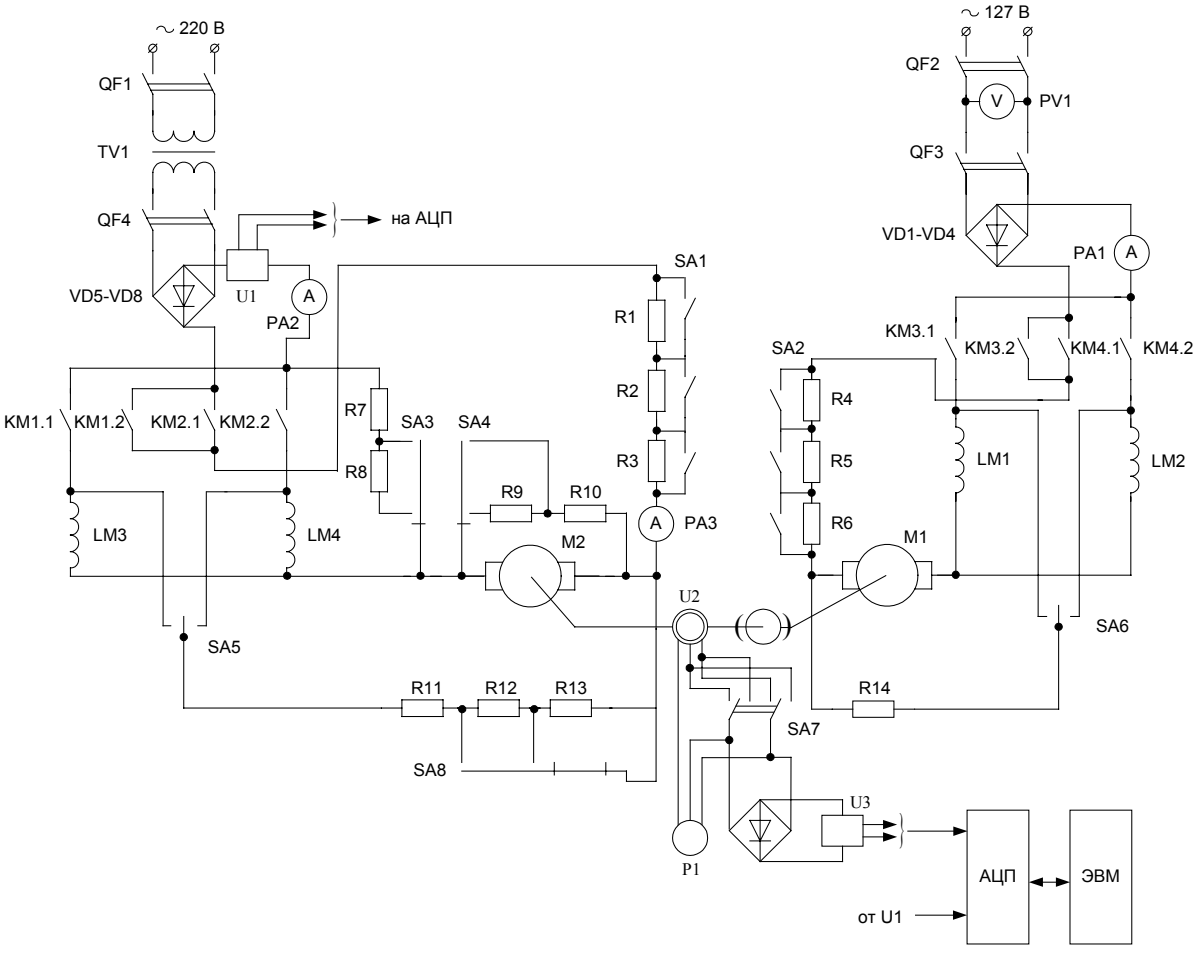


Рисунок 3 – Схема лабораторного стенда

Автоматом QF1 подается питание напряжением 220В, а автоматом QF2 – питание от регулируемого трансформатора.

Включение или выключение двигателей осуществляется реверсивными пускателями KM1 и KM2.

Автоматами QF3 и QF4 подается напряжение через выпрямительные мосты и через пускатели KM1 и KM2 на обмотки двигателей.

Во избежание больших пусковых токов, двигатели запускаются с введенными всеми имеющимися добавочными сопротивлениями. Для вывода на естественную характеристику, сопротивления ступенчато выводятся универсальными переключателями SA2 (M1) и SA1 (M2).

При необходимости динамического торможения используются SA6 (M1) и SA5 (M2), (сопротивление динамического торможения для двигателя M2 можно ступенчато изменять переключателем SA8).

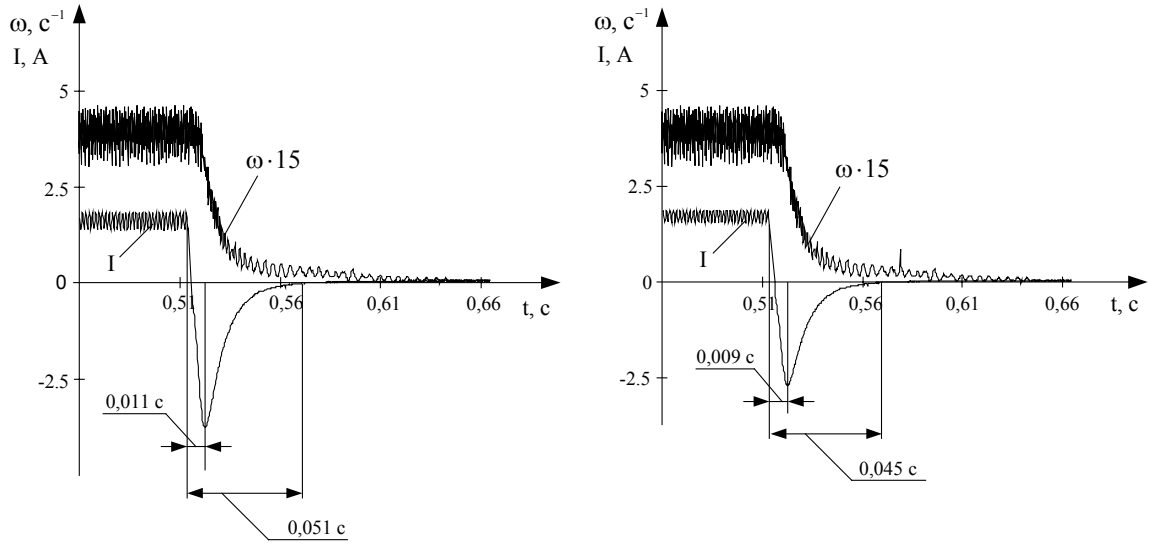
Для введения и изменения шунтирующего сопротивления в цепь возбуждения используется выключатель SA3 (M2), а в цепь якоря – выключатель SA4 (M2).

В состав стенда также входят два датчика: датчик тока U1 и датчик напряжения U3. Датчик тока включен в цепь двигателя M2, а датчик напряжения – на выходе тахогенератора U2.

Номинальные данные двигателей, используемых в стенде:

- тип двигателя - ПК-1;
- номинальная мощность - $P_н = 120\ Вт$;
- номинальное напряжение - $U_н = 110\ В$;
- номинальный ток якоря - $I_н = 2\ А$;
- номинальная скорость - $n_н = 600\ об/мин$;
- КПД - $\eta = 55\ \%$.

Лабораторный стенд позволяет использовать компьютеризированный измерительный комплекс, что существенно увеличивает информативность проведения экспериментов.В результате эксперимента на лабораторном стенде с использованием компьютеризированного измерительного комплекса были получены графики (рис. 4,5).



а) б)

Рисунок 4 - Характеристики динамического торможения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с самовозбуждением, снятые на экспериментальной установке, при различных сопротивлениях динамического торможения: а) $R_{дт}$=8 Ом, б) $R_{дт}$=16 Ом

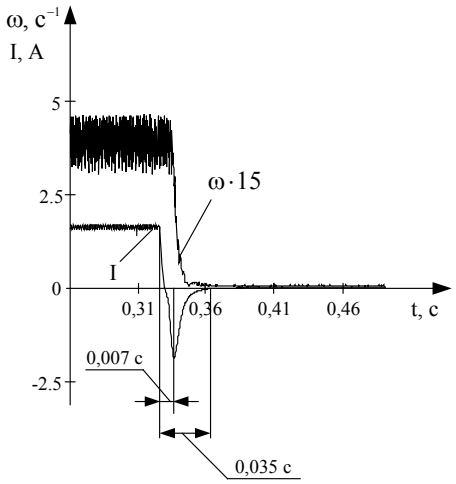


Рисунок 5 - Характеристики динамического торможения двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с самовозбуждением, снятые на экспериментальной установке, при сопротивлении динамического торможения $R_{дт}$=23 Ом

На основании полученных результатов можно провести анализ физической картины процесса самовозбуждения двигателя последовательного возбуждения.

Для двигателя в режиме самовозбуждения вид механической характеристики при динамическом торможении с самовозбуждением неблагоприятен с точки зрения управления. Если выполняются условия самовозбуждения, то начальная стадия процесса самовозбуждения характеризуется слабым нарастанием ЭДС, тока и соответственно момента, которое обусловлено потоком остаточного намагничивания. По достижению критической скорости в результате самовозбуждения машины начинается лавинообразное нарастание ЭДС, тока и соответственно увеличение момента во времени. Механическая характеристика при этом терпит излом.

Список литературы

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. -Л.: Энергоатомиздат, 1962
2. Вольдек А.И. Электрические машины. -Л.: Энергия, 1974.
3. Черный А.П., Луговой А.В., Родькин Д.И., Садовой А.В. Моделирование электромеханических систем / Учебное пособие. -Кременчуг: 1999.
4. Ключев В.И. Теория электропривода. Учебник для вузов. -М.: Энергоатомиздат, 1985.

УДК 621.314.632:658.512.011

А.І.Гладир, доц., М.Ю. Юхименко
Кременчуцький державний політехнічний університет
В.І. Гомілко
ЗАТ "Науково-технічний центр "Інформаційні системи", Кременчук

Технологія автоматизованого проектування в лабораторному практикумі

У статті представлена методика вивчення сучасних методів проектування і налагодження цифрових систем керування електроприводами, описане устаткування, розроблене для реалізації запропонованої методики, намічені шляхи удосконалювання запропонованих принципів підготовки фахівців в області електромеханіки.

програмно-апаратний комплекс, інтегрована середовище розробки, внутрішньосхемне налагодження

Вступ

Інтенсивний розвиток обчислювальної техніки відкриває принципово нові можливості для конструкторів і проектувальників. Особливе місце серед програмного забезпечення займають системи автоматизованого проектування (САПР). Спеціалізовані САПР знайшли своє застосування в географії, архітектурі, машинобудуванні, електротехніку, електроніці і т.д. Під загальноприйнятим скороченням САПР (англ. CAD) розуміють як систему конструювання (Computer Aided Design), так і систему технічного креслення (Computer Aided Drafting and Drawing) за допомогою комп'ютера. Системи автоматизації проектування електронних пристроїв одержали назву EDA (Electronic Design Automation). Системи автоматизованого проектування завдяки швидкодії і надійності обчислювальної техніки, досконалості математичних моделей і ефективних методів оптимізації дозволяють не тільки прискорити розробку проектів, звільнити інженерів і техніків від виконання рутинних процедур, але й скоротити в цілому тривалість створення нових пристроїв і систем, підвищити показники їхньої якості.

Широке використання комп'ютерів у всіх цих сферах діяльності сучасного інженера пред'являє до його професійної кваліфікації ряд додаткових вимог, що полягають в оволодінні новими інформаційними технологіями інженерної праці. В умовах сучасного виробництва існують жорсткі вимоги до витрат часу на розробку і впровадження систем електропривода, а також автоматизованих систем керування технологічним процесами (АСКТП). Тому розроблювачі все частіше йдуть шляхом використання CALS-технологій (Continuous Acquisition and Life cycle Support) – безупинної інформаційної підтримки життєвого циклу продукту від розробки до введення виробів в експлуатацію. Це стосується як проектно-конструкторської документації, так і програмно-апаратного забезпечення. Згодом, по закінченні проектування системи, розроблювач технічних засобів бере участь у пусконалагоджувальних роботах, налагодженні роботи приладів в умовах перешкод, переробці схем і заміні використовуваних пристроїв. При цьому складність проектів досягає такого рівня, що тільки розроблювач АСУ може коректно й у стислий термін здійснити її запуск. Розроблювач безпосередньо бере участь у пуску, налагодженні і супроводі спроектованих систем, тому що будь-яка помилка негайно викликала б істотний зріст витрат.

У цих умовах перед вищою школою постає завдання підготовки майбутніх фахівців до роботи із сучасними засобами автоматизованого проектування, які вони будуть

© А.І.Гладир, М.Ю. Юхименко, В.І. Гомілко. 2004

використовувати в подальшій інженерній діяльності. Таким чином, актуальним є створення і впровадження в навчальний процес методики, здатної освітити основні питання автоматизованого проектування сучасних систем електропривода.

На кафедрі «Систем автоматичного керування й електропривода» Кременчуцького державного політехнічного університету був розроблений програмно – апаратний і методологічний комплекс, орієнтований на навчання студентів навичкам розробки цифрових систем керування електроприводом з використанням САПР MAX+PLUS II фірми Altera, і системи MPLAB IDE фірми Microchip.

Мета і задачі дослідження

Метою розробки комплексу для вивчення засобів автоматизованого проектування є формування представлення про основні елементи, структуру, алгоритми і принципи функціонування промислових систем автоматизованого проектування; отримання практичних навичок роботи із широко відомими засобами розробки цифрових пристроїв і систем керування; створення своєрідного “фундаменту” для освоєння інших засобів САПР, з якими майбутній фахівець зустрінеться в процесі інженерної діяльності.

Результати і матеріали дослідження

Оскільки автоматизоване проектування передбачає операції як з інформаційними, так і з фізичними об'єктами, процес навчання фахівців – електромеханіків має базуватися не тільки на використанні відповідного методичного та комп'ютерного забезпечення, але, що не менш важливо, мати практичний прикладний характер, тобто орієнтуватися на проектування саме систем автоматизованого електроприводу. При цьому максимальний ефект досягається в тому випадку, коли студент у процесі вивчення САПР пройде всі етапи створення пристрою – від проектування до пуско-налагодження. Реалізація такого підходу полягає у об'єднанні комплексу САПР з реальною електромеханічною системою, наприклад, лабораторним стендом, що вже добре знайомий студентам із проведених раніше лабораторних робіт. При цьому основною метою навчання є ознайомлення студентів з елементами, структурою, принципами функціонування САПР і придбання ними практичних навичок самостійного проектування цифрових пристроїв на сучасній елементній базі.

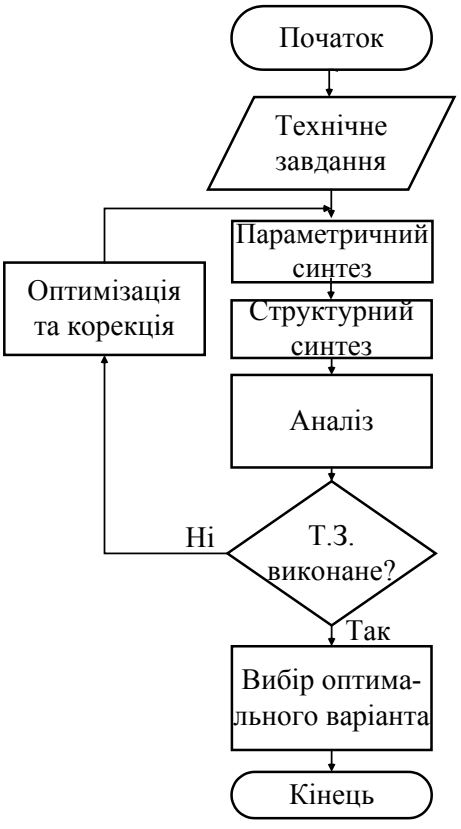


Рисунок 1 - Узагальнений алгоритм проектування системи

В основі запропонованого методу лежить класичний алгоритм проектування пристроїв і систем (рис. 1), що передбачає можливість багаторазового повторення процесів синтезу, аналізу, оптимізації та корекції до отримання оптимального варіанта пристрою, що проектується.

Запропонована методика базується на досить простих і добре зрозумілих на практиці методах і засобах проектування:

- покрокова деталізація;

- контроль отриманих результатів на виході кожного етапу
- блочно – модульне проектування.

У ході виконання лабораторних робіт студент може, самостійно використовуючи розроблені методичні матеріали, ознайомитися зі структурою пакета програм, вивчити на простих прикладах порядок створення проекту системи керування в рамках того чи іншого засобу розробки, поетапно виконати реалізацію проекту і контролювати результати своєї роботи на кожнім з етапів створення проекту.

Розроблений практикум призначений для вивчення структури й особливостей роботи із системою MAX+PLUS II фірми Altera і середовищем розробки MPLAB ID фірми Microchip і практичного освоєння методів проектування цифрових пристроїв з їхнім використанням. Вибір засобів проектування і відповідної елементної бази ґрунтувався як на приступності безкоштовних САПР MAX+PLUSII, фірми Altera і MPLAB IDE фірми Microchip, так і на наявному лабораторному устаткуванні.

САПР MAX+PLUS II фірми ALTERA підтримує повний цикл проектування цифрових пристроїв на ПЛІС цієї фірми. Система проектування працює на PC - платформі і робочих станціях. САПР надає різноманітні засоби вхідного опису, включаючи інтерфейси зі стандартними мовами і найбільш розповсюдженими пакетами, і забезпечує ефективні алгоритми синтезу, що дозволяють максимально використовувати ресурси кристала, часовий і функціональний аналіз розробленої схеми й орієнтована на сумісність із промисловими стандартами VHDL, EDIF, Verilog.

MPLAB IDE v. 6.xx це нове 32 – бітне інтегроване безкоштовне середовище розробки для мікроконтролерів PICmicro фірми Microchip Technology Incorporated, оптимізоване для роботи із системою Windows. MPLAB IDE дозволяє створювати, налагоджувати й оптимізувати текст програм. Система MPLAB IDE містить редактор тексту, симулятор і менеджер проектів, підтримує роботу емуляторів (MPLAB-ICE і PICMASTER) і програматорів (PICSTART plus, PRO MATE) та інших налагоджувальних засобів фірми Microchip або сторонніх виробників.

В якості лабораторної бази для освоєння студентами навичок розробки і реалізації систем електропривода з використанням САПР, вибраний стенд для вивчення кранового механізму постійного струму на базі типового магнітного контролера серії П. У процесі модернізації в схему стенда уведений блок узгодження для підключення цифрових СУ. Розроблені і виготовлені блоки керування на базі ПЛІС MAX 7032SLC44-5 і на мікроконтролері PIC16F877.

Функціональна схема лабораторної установки представлена на рис. 2.

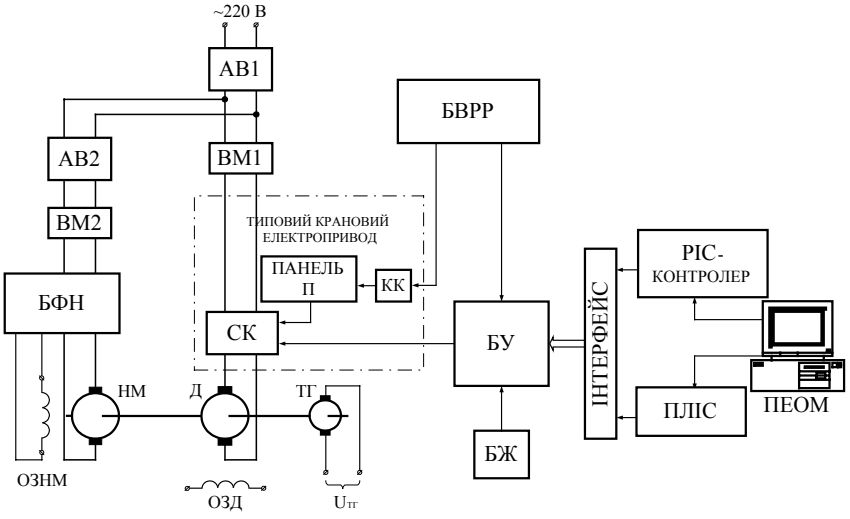


Рисунок 2 - Функціональна схема лабораторної установки

Експериментальна установка являє собою робочий стіл з панеллю керування і командоапаратом, електромашинний агрегат Д-НМ (двигун - навантажувальна машина), вертикальну стійку, на якій зібрана релейно-контакторна частина системи керування типової панелі серії П. До складу стенда сходять КК – командоконтролер – призначений для керування режимами роботи двигуна Д, РЗНМ – регулятор збудження навантажувальної машини – призначений для зміни напруги живлення обмотки збудження навантажувальної машини, АВ1 – автоматичний вимикач для подачі напруги живлення в силове коло двигуна, АВ2 – автоматичний вимикач – призначений для подачі напруги живлення в силове коло навантажувальної машини. На лицьовому боці стенда знаходиться складальна панель, призначена для складання кола керування, зображеного на мнемосхемі установки. Для підключення цифрової системи керування, реалізованої на базі ПЛІС або програмованих мікроконтролерах, передбачено блок узгодження (БУ).

У процесі виконання лабораторної роботи студент спочатку створює робочий проект за допомогою засобів розробки САПР MAX+PLUS II і MPLAB IDE, виконує його верифікацію вбудованими засобами пакета, компіляцію часовий аналіз, моделювання роботи пристрою. Потім, за допомогою підключеного до персонального комп'ютера програматора ByteBlaster (MV) (рис. 3) або внутрішньосхемного програматора, налагоджувальника та дебагера MPLAB ICD 2 (рис. 4), здійснює програмування цільової мікросхеми. Після цього блок керування з запрограмованою ПЛІС або мікроконтролером підключається до лабораторного стенда через блок узгодження (див. рис. 2) і студент може перевірити відповідність роботи пристрою заданим алгоритмам функціонування. На рис. 3 показаний апаратний комплекс для освоєння прийомів роботи із САПР MAX+PLUS II на базі ПЛІС фірми Altera, на рис. 4 - аналогічний комплекс для роботи із середовищем проектування MPLAB IDE.

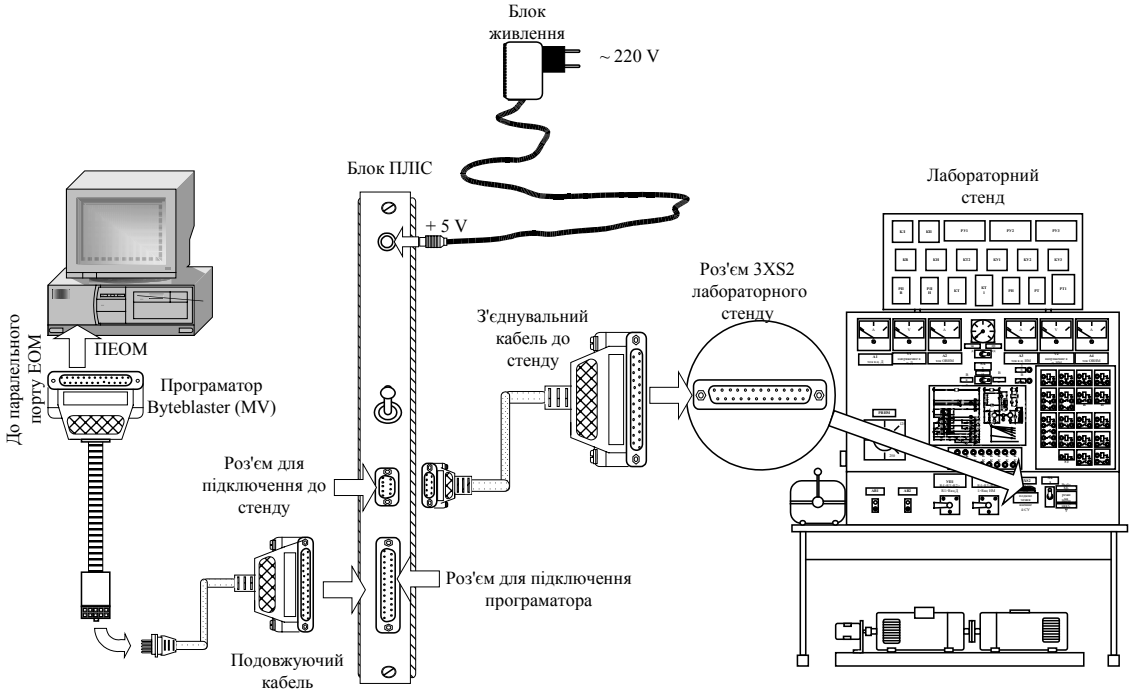


Рисунок 3 - Схема апаратного комплексу на базі ПЛІС

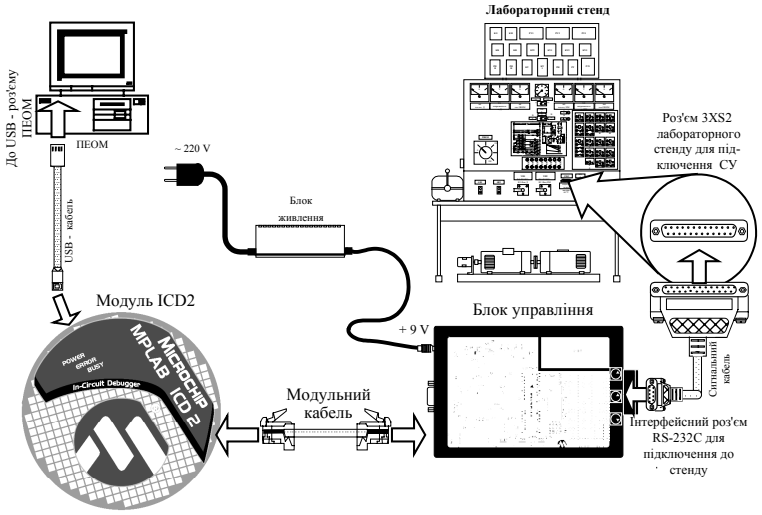


Рисунок 4 - Схема апаратного комплексу на базі мікроконтролера PICmicro

У процесі проходження лабораторного практикуму студенти здобувають професійні навички, необхідні розроблювачу сучасних цифрових пристроїв на базі ПЛІС і МК, і вчаться використовувати відповідні інструментальні засоби проектування при рішенні конкретних прикладних задач, а також освоюють технологію опису і налагодження робочих проектів у середовищі MAX+PLUS II і MPLAB IDE.

До переваг запропонованої методики варто віднести в першу чергу, то, що:

- студенти добре знайомі з використованою лабораторною базою, що спрощує освоєння навичок автоматизованого проектування систем електропривода;
- студенти отримують можливість виконати в ході лабораторної роботи повний цикл проектування пристрою: від постановки задачі і розробки алгоритму функціонування до створення проекту, налагодження і моделювання роботи, а потім реалізації на апаратному рівні;
- розроблені апаратні засоби навчання є гнучкими, дозволяють легко перенастроювати їх і можуть бути використані в умовах навчальної лабораторії при курсовому та дипломному проектуванні.

На закінчення ще раз підкреслимо, що розглянута методика не обмежується приведеними прикладами реалізації цифрових СУ, що лише ілюструють її можливості. Досвід проведених лабораторних робіт показав ефективність запропонованого методу освоєння сучасних САПР і стимулював зацікавленість студентів у більш глибокому вивченні, освоєнні і використанні пропонованої методики проектування у своїй подальшій практичній діяльності.

Список літератури

1. Бродин В.Б., Шагурин И.И. МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ: архитектура, программирование, интерфейс. — М.: ЭКОМ, 1999. – 487 с.
2. Ильин В.Н., Фролкин В.Т. и др. Автоматизация схемотехнического проектирования: Уч. пособие для вузов /Под ред. В.Н. Ильина. -М.: Радио и связь, 1987. - 368 с.
3. Сташин В. В., Урусов А. В., Мологонцева О. П.. Проектирование цифровых устройств на однокристальных микроконтроллерах. – М., Энергоатомиздат, 1990. - 224 с.
4. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы “Altera”: элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры М.: Издательский дом “Додэка-XXI”, 2002. – 283 с.
5. Токхайм Р. Микропроцессоры: курс и упражнения. Пер. с англ. – М.,Энергоатомиздат, 1988. – 336 с.
6. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника Санкт - Петербург: “БХВ - Санкт-Петербург“, 2004.- 502 с.
7. Фрунзе А., Хоркни С. Однокристальные микро -ЭВМ. //РАДИО, 1994.- №№ 8-12. -1995 - , №№ 1-3. с. 41 – 43.
8. Яценков В. С. Микроконтроллеры Microchip: Практическое руководство. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2001. — 296 с. ил.

УДК 621.311.004

А.А. Колб, доц., канд. техн. наук
Национальный горный университет

Управляемые статические устройства компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения

Предложена замкнутая система автоматического регулирования амплитуды и фазы напряжения вольтдобавочного трансформатора на высокой стороне комплектной трансформаторной подстанции на основе полностью управляемых инверторов напряжения с ШИМ и векторным принципом формирования параметров управляющих воздействий.
реактивная мощность, компенсация, стабилизация напряжения, релейно-векторное управление

Постановка проблемы

Надежное электроснабжение потребителей качественной электроэнергией в значительной степени зависит от применения современных быстродействующих автоматических устройств компенсации неактивных составляющих мощности на основе силовых полностью управляемых преобразователей напряжения с ШИМ. Системы управления качеством электроэнергии, построенные по принципу замкнутых систем регулирования, обладают более широкими функциональными возможностями и при выборе соответствующих структур и алгоритмов, например релейно-векторного управления, позволяют достичь требуемых статических и динамических показателей, а также обеспечить инвариантность показателей качества от внешних и параметрических возмущений. Для исключения противоречий между устойчивостью и инвариантностью САР качества электроэнергии следует применять перспективные релейно-векторные системы управления.

Необходимость поддержания напряжения в различных точках сети в достаточно узких пределах предопределяет необходимость его регулирования. При этом объединение функций компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения нагрузки имеет большие перспективы. Успешное решение этой проблемы на основе АИН с ШИМ и релейно-векторной системой управления позволяет быстро и точно разгрузить сеть от неактивных составляющих полной мощности в случае реактивных, резкопеременных, несимметричных и нелинейных (включая мощные вентильные преобразователи) нагрузок. Это обеспечивает дальнейшее повышение качества электроэнергии, надежности электроснабжения, устойчивости и экономичности энергосистем.

Наиболее важной проблемой при разработке законов и алгоритмов управления источниками реактивной мощности на базе АИН с ШИМ является выбор управляющих воздействий, по изменению которых следует реализовать их регулирование.

Анализ последних достижений и публикаций

В настоящее время применяется большое количество различных устройств для компенсации реактивной мощности и стабилизации напряжения в точке присоединения в соответствии с заранее заданным графиком [1…4]. Такие устройства при изменении режима работы не позволяют достичь желаемого экономического эффекта в сравнении

© А.А. Колб. 2004

с регулируемыми [1]. Регулируемые статические компенсирующие устройства на основе конденсаторных батарей и управляемых реакторов (или насыщающихся [5]) являются источниками высших гармоник и вызывают резонансные явления.

Для регулирования напряжения на высокой стороне подстанций применяют также трехфазные линейные регуляторы на основе вольтдобавочных трансформаторов (ВДТ) с механическим переключающим устройством, которые обладают известными недостатками [1,4].

Предположенная в [6] система амплитудно-фазового управления напряжением ВДТ с помощью инверторов напряжения с фазовым управлением имеет сложную структуру и существенно увеличивает несинусоидальность напряжения вследствие амплитудного принципа регулирование выходного напряжения инвертора.

Целью работы является разработка достаточно простой и быстродействующей замкнутой системы автоматического регулирования амплитуды и фазы напряжения ВДТ на высокой стороне комплектной трансформаторной подстанции на основе полностью управляемых инверторов напряжения с ШИМ и векторным принципом формирования параметров управляющих воздействий.

Результаты исследования

Применение обобщенных пространственных векторов напряжения и тока для математического описания процессов в трехфазных системах с нелинейной и несимметричной нагрузкой исключает проблемы определения мгновенной мощности и ее ортогональных составляющих и тем самым позволяют разработать эффективные законы (критерии и алгоритмы) управления источниками реактивной мощности на основе инверторов напряжения с ШИМ. Выбор вращающийся системы координатных осей при векторном управлении позволяет вместо реальных периодических переменных токов и напряжений сети оперировать соответствующими им постоянными величинами, что значительно упрощает формирование и обработку управляющих воздействий с помощью традиционных регуляторов на операционных усилителях.

В общем случае результирующий пространственный вектор, например, напряжения сети выражается уравнением [7]

$$\overline{U} = \frac{2}{3}(u_A + \overline{\alpha} u_B + \overline{\alpha}^2 u_C) = U e^{j\omega t}, \qquad (1)$$

где u_A, u_B, u_C - мгновенные значения напряжений трехфазной системы;

$\overline{\alpha} = e^{j120^\circ}, \overline{\alpha}^2 = e^{j240^\circ}$ - единичные векторы, сдвигающие фазу в положительном направлении соответственно на 120° и 240°;

$2/3$ - согласующий коэффициент, найденный из условия инвариантности мощности;

ω - круговая частота напряжения сети.

Результирующий вектор напряжения можно разложить в неподвижной системе координат α, β на вещественную и мнимую составляющие

$$\overline{U} = U_\alpha + jU_\beta \qquad (2)$$

и перейти от трехфазной системы напряжения к двухфазной.

Связь между составляющими U_α, U_β и мгновенными значениями напряжениями отдельных фаз определяется выражениями:

$$U_\alpha = \mathrm{Re}(\overline{U}) = \mathrm{Re}[\frac{2}{3}(u_A + \overline{\alpha} u_B + \overline{\alpha}^2 u_C) = \frac{2}{3}[u_A - \frac{u_B + u_C}{2}];$$

$$U_\beta = \mathrm{Im}(\overline{U}) = \mathrm{Im}[\frac{2}{3}(u_A + \overline{\alpha} u_B + \overline{\alpha}^2 u_C) = \frac{u_B + u_C}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

В случае $U_A + U_B + U_C = 0$:

$$U_\alpha = U_A;\ U_\beta = \frac{(U_B - U_C)}{\sqrt{3}}. \quad (4)$$

Если ось α совместить с вектором фазы А неподвижной системы трехфазных векторов, изображающих напряжение обратной последовательности, то проекции результирующих векторов на эту систему векторов определяют мгновенные значения фазных величин.

На основании (2-4) мгновенные значения фазных величин в функции соответствующих составляющих U_α, U_β определяются уравнениями:

$$u_A = U_\alpha;\ u_B = -\frac{U_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} U_\beta;\ u_C = -\frac{U_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} U_\beta. \quad (5)$$

Переход от составляющих токов неподвижной системы координат α, β к вращающейся x, y, ось x которой ориентирована по результирующему вектору напряжения первичной обмотки силового трансформатора реализуется с помощью соотношений, найденных на основании рис. 1

$$\overline{I}_{\alpha,\beta} = Ie^{j\varphi_i} = Ie^{j(\alpha - \varphi_1)} = \overline{I}_{x,y} e^{j\alpha}, \quad (6)$$

где $\overline{I}_{\alpha,\beta}; \overline{I}_{x,y} = \overline{I}_{\alpha,\beta} e^{-j\alpha}$ - результирующий вектор тока соответственно в неподвижной и вращающейся системах координат; φ_i - угол между вектором $\overline{I}$ и осью α неподвижной системы координат; α - угол между координатными осями неподвижной и вращающейся системой координат (рис. 1); φ_1 - фазовый сдвиг между напряжением и током первичной обмотки трансформатора.

Обратный переход реализуется с помощью выражения

$$\overline{I}_{x,y} = \overline{I}_{\alpha,\beta} e^{-j\alpha}. \quad (7)$$

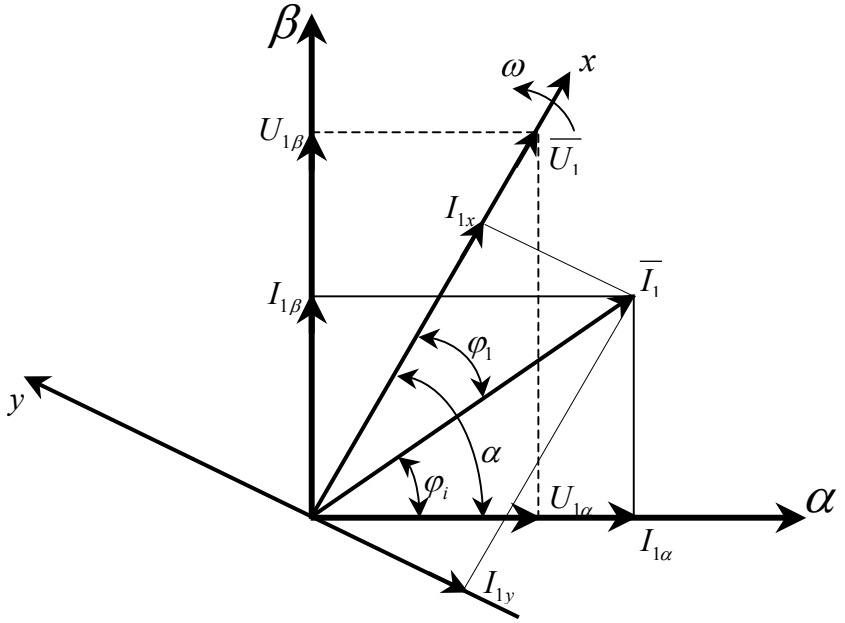


Рисунок 1 - К переходу от неподвижной системы координат к вращающейся

На основании выполненных исследований и приведенных выражений разработана автоматическая система амплитудно-фазового регулирования напряжения ВДТ для компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения на нагрузке комплектных трансформаторных подстанций (рис. 2).

Приведенная САР реактивной мощности содержит ВДТ, вторичная обмотка которого подключена к полностью управляемому инвертору (И) напряжения на основе ШИМ с высокой частотой коммутации. Это позволяет с помощью одного преобразователя напряжения регулировать с высокой точностью в широких пределах величину и фазу выходного напряжения ВДТ и, следовательно, значение и знак реактивной мощности. В звене постоянного тока инвертора подключен емкостной накопитель (С) для обмена реактивной энергией между фазами ВДТ. Потери энергии в емкостном накопителе компенсируются путем подзарядки его от выпрямителя (В), подключенного к вторичной обмотке силового трансформатора (Тр).

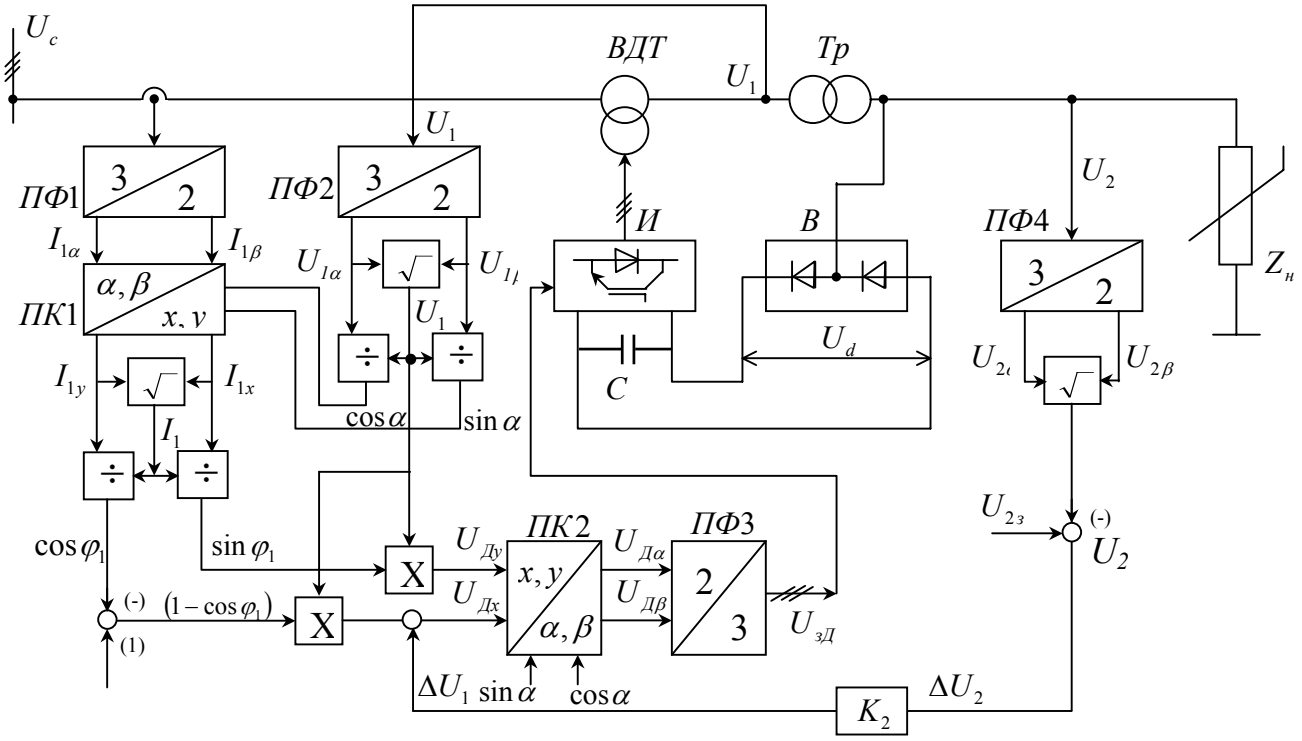


Рисунок 2 - Функциональная схема замкнутой системы автоматического регулирования амплитуды и фазы напряжения ВДТ для компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения на нагрузке

Основные элементы системы управления: ПФ1…ПФ4 – преобразователи фаз для перехода от трехфазной системы к двухфазной, выполненные на основании (2)…(4); ПК1…ПК2 – преобразователи координат для перехода от неподвижной системы координат к вращающейся и наоборот, построенные соответственно на основании (6) и (7).

Плавное регулирование потребляемой или генерируемой реактивной энергии реализуется путем отстающего или опережающего регулирования фазы выходного напряжения ВДТ по отношению к напряжению сети в функции реактивной мощности. В режиме генерации реактивной мощности реализуется опережающее регулирование фазы выходного напряжения ВДТ, а в режиме потребления – отстающее.

Построение замкнутых быстродействующих САУ реактивной мощностью требует применения устройств ее измерения (идентификации), работающих в режиме реального времени. Наиболее просто эта задача решается на основе обобщенных

(результирующих) пространственных векторов напряжения и тока в ортогональной вращающейся системе координат x, y, ось x которой ориентирована по вектору напряжения сети. При этом сумма ортогональной составляющей обобщенного вектора тока по оси y и переменной составляющей по оси x пропорциональна неактивной составляющей полной мощности [8].

На основании рис. 1 пространственное положение результирующего вектора напряжения $\overline{U}_1$ первичной обмотки трансформатора определяется как:

$$\cos\alpha = \frac{U_{1\alpha}}{U_1};\ \sin\alpha = \frac{U_{1\beta}}{U_1}, \tag{8}$$

где $U_1 = \sqrt{U_{1\alpha}^2 + U_{1\beta}^2}$, $U_{1\alpha}, U_{1\beta}$ - модуль результирующего вектора напряжения $\overline{U}_1$ и его ортогональные составляющие в неподвижной системе координат.

Косинусная и синусная составляющие фазового сдвига между результирующими векторами напряжения и тока первичной обмотки трансформатора:

$$\cos\varphi_1 = \frac{I_{1x}}{I_1};\ \sin\varphi_1 = \frac{I_{1y}}{I_1}, \tag{9}$$

где $I_1 = \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2};\ I_{1x,}\, I_{1y}$ - модуль результирующего вектора тока и его ортогональные составляющие во вращающийся системе координат *x, y*.

Векторная диаграмма, поясняющая пространственно-фазовое формирование результирующего вектора напряжения $\overline{U}_Д$ ВДТ для случая полной компенсации реактивной мощности сети, представлена на рис. 3, где $\overline{U}_C, \overline{U}_1', \overline{I}_1'$ - результирующие векторы напряжения сети, первичной обмотки трансформатора и тока при отсутствии напряжения ВДТ; $\overline{U}_Д, U_{Дx}, U_{Дy}$ - результирующий вектор напряжения ВДТ и его ортогональные составляющие во вращающейся системе координат; $\overline{I}_Д$ - результирующий вектор тока, обусловленный напряжением ВДТ; $\overline{U}_1$, $\overline{U}_{1\Sigma}$ - результирующий вектор напряжения первичной обмотки трансформатора при полной компенсации реактивной мощности сети соответственно без и при изменении амплитуды напряжения U_1.

Согласно обозначений, принятых на рис.3, ортогональные составляющие напряжения ВДТ во вращающейся системе координат определяются как:

$$\begin{aligned} U_{Ду} &= 2U_1 \sin(\frac{\varphi_1}{2})\cos(\frac{\varphi_1}{2}) = U_1 \sin\varphi_1; \\ U_{Дx} &= 2U_1 \sin^2(\frac{\varphi_1}{2}) = U_1(1-\cos\varphi_1). \end{aligned} \tag{10}$$

Выходное напряжение автономного инвертора напряжения в режиме ШИМ (напряжения вторичной обмотки ВДТ) по отношению к напряжению U_2 на нагрузке определяется как:

$$U_{2Д} = \frac{m}{2\sqrt{2}} k_{сх} U_2 e^{\pm j\beta} = k_Д U_2 e^{\pm j\beta}, \tag{11}$$

где m – коэффициент модуляции;

$k_{сх}$ – коэффициент схемы трехфазного мостового преобразователя;

β – фазовый сдвиг напряжения инвертора по отношению к напряжению U_2 на нагрузке.

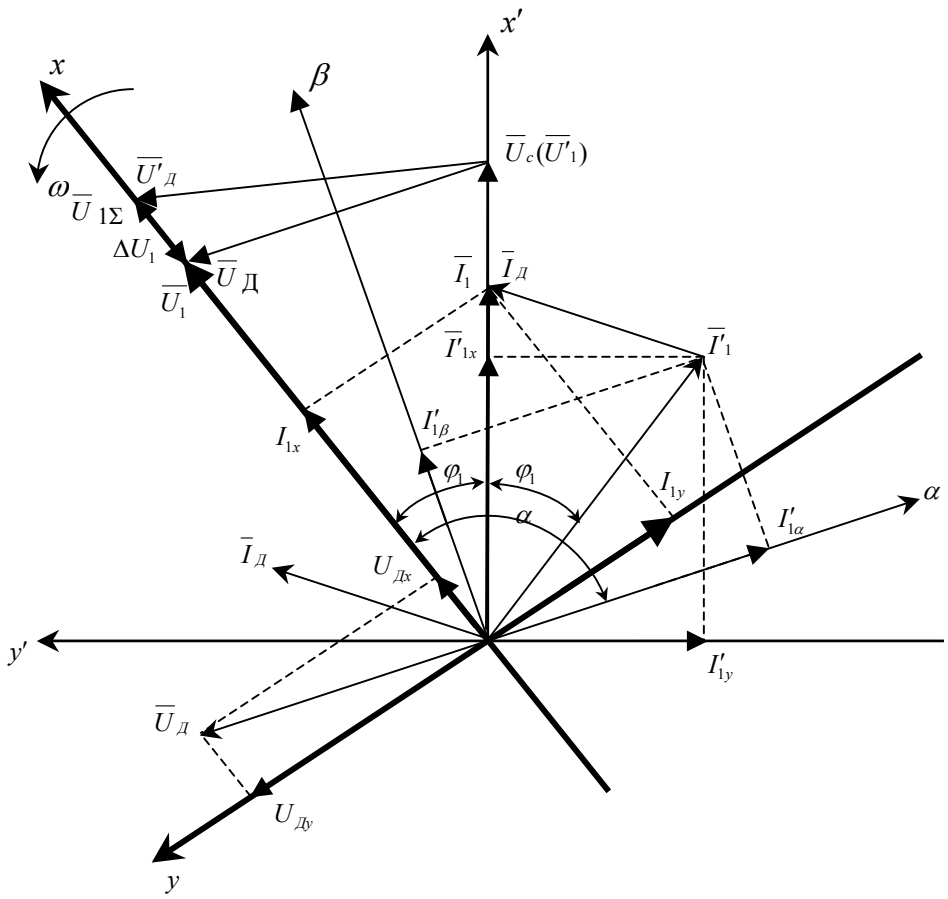


Рисунок - 3. Векторная диаграмма напряжений и токов формирования напряжения ВДТ для компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения нагрузки

Напряжение первичной обмотки ВДТ

$$U_{1Д} = k_{тр} U_{2Д} = k_{тр} k_Д U_2 e^{\pm j\beta}, \tag{12}$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трансформации ВДТ.

Напряжение U_1 на первичной обмотке силового трансформатора (Тр)

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_c + \dot{U}_{1Д} = \dot{U}_c + k_{тр} k_Д U_2 e^{\pm j\beta}, \tag{13}$$

где U_c – напряжение сети.

Напряжение U_2 на нагрузке с учетом коэффициента трансформации k_c силового трансформатора, отклонения напряжения в сети ΔU_c и падения напряжения на трансформаторе $\Delta U_к$

$$\dot{U}_2 = (\dot{U}_c \pm \Delta\dot{U}_c - k_{тр} k_Д U_2 e^{\pm j\beta}) / k_c, \tag{14}$$

где $\Delta\dot{U}_к = Z_к \dot{I}'_2$, $Z_к$ – соответственно падение напряжения и суммарное сопротивление короткого замыкания ВДТ и силового трансформатора;

I'_2 - приведенный ток вторичной обмотки силового трансформатора.

Согласно (14) имеем:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_c \pm \Delta\dot{U}_c - \dot{U}_к}{k_c - k_{тр} k_Д e^{\pm j\beta}} \tag{15}$$

Согласно (13) регулирование величины и фазы вектора первичной обмотки ВДТ, например, в сторону опережения при активно-индуктивной нагрузке позволяет обеспечить требуемую ориентацию вектора тока сети по отношению к напряжению сети. Если при этом реализовать фазовый сдвиг между напряжением и током сети,

равным фазовому сдвигу в режиме холостого хода трансформатора, то обеспечивается полная компенсация реактивной мощности на входе подстанции (силового трансформатора). Следовательно, регулируя величину и фазу напряжения ВДТ можно в широких пределах реализовать как потребление из сети, так и генерирование в сеть реактивной мощности.

Для стабилизации напряжения на нагрузке трансформатора в систему регулирования вводится корректирующий сигнал $\Delta U_1 = K_2 \Delta U_2$, который алгебраически суммируется с составляющей напряжения $U_{Дх}$ (рис. 3),

где K_2 - коэффициент пропорциональности, учитывающий коэффициенты передачи преобразователей фаз ПФ2 и ПФ4, а также коэффициент трансформации ВДТ;

$\Delta U_2 = U_{2з} - U_2$ - колебание напряжения нагрузки относительно заданного значения $U_{2з}$;

U_2 - модуль результирующего вектора напряжения нагрузки.

Составляющие $U_{Дх}, U_{Ду}$ напряжения ВДТ с помощью преобразователя координат ПК2 и фаз ПФ3 трансформируются в трехфазную систему задающих сигналов $U_{зД}$, которые пропорциональны требуемому мгновенному значению амплитуды и фазы напряжения ВДТ для полной компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения нагрузки.

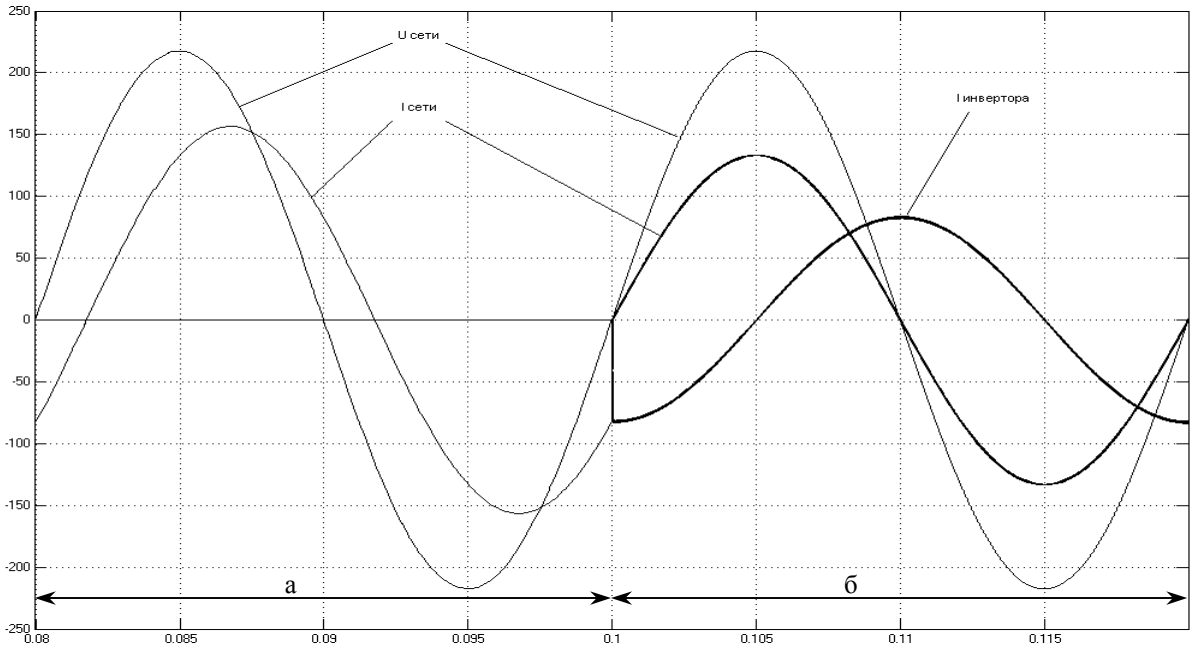


Рисунок - 4. Результаты компьютерного моделирования работы САР напряжения на нагрузке: без (а) и совместно (б) с САР

Выводы

Высокое быстродействие предлагаемой САР с векторным принципом формирования параметров управляющих воздействий позволяет реализовать полную компенсацию реактивной мощности сети с одновременной стабилизацией напряжения нагрузки независимо от внешней характеристики сети и характера нагрузки, а также возмущающих воздействий. Это достигается за счет непрерывного и плавного

регулирования амплитуды и фазы напряжения ВДТ в функции реактивной мощности, контролируемой с помощью пропорциональной ей составляющей I_{1y} результирующего вектора $\bar{I}_1$, и отклонения напряжения нагрузки от заданного значения. Достаточно простая структура САР достигается вследствие использования при математическом описании и выделении (идентификации) параметров управляющих воздействий результирующих пространственных векторов напряжения и тока во вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети.

Список литературы

1. Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
2. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – К.: Техніка, 1981. – 160 с.
3. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
4. Мельников Н.А., Солдаткина Л.А. Регулирование напряжения в электрических сетях. – М.: Энергия, 1968. – 152 с.
5. Регулирование напряжения в сетях при помощи статического компенсатора с параметрическим регулированием / Кучунов Л.А., Черновец А.К., Орлов В.С. и др. – Электричество, 1973, №10, С.-12-17.
6. Иньков Ю.М., Климов В.С. Компенсаторы реактивной энергии сети со стабилизацией напряжения нагрузки трансформаторных подстанций. // Электричество.-2003.-№12.-С.11-16.
7. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер. с. нем. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
8. Колб А.А. Система автоматического регулирования качества электроэнергии на основе полностью управляемых инверторов с релейно-векторным управлением / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 2/2004 (25), с. 37-41.

УДК 621.313:62-83

Т.В. Коренькова, доц., канд. техн. наук, Д.А. Михайличенко, А.М. Кравец
Кременчугский государственный политехнический университет

Технологические и энергетические возможности насосной станции с активным регулированием параметров

В статье выполнено научно-техническое обоснование целесообразности использования в насосных станциях активных регулировочных устройств, выступающих альтернативным решением ступенчатому регулированию параметров, дросселированию, регулированию изменением частоты вращения вала насоса. Выполнен сравнительный анализ технологических диапазонов регулирования выходных параметров и энергетических показателей системы активного регулирования производительности насосной установки при работе на сеть потребителя и использовании гидротурбин различных типов с регулированием расхода изменением частоты вращения колеса турбины и степени открытия направляющего аппарата.
насосная установка, активное регулирование, гидротурбина, сеть потребителя

Технологические комплексы, оборудованные насосами, вентиляторами, компрессорами, являются важнейшими объектами народнохозяйственной деятельности человека и широко используются в химической, горнодобывающей, нефтегазотранспортной отраслях; промышленном и коммунальном водоснабжении; тепловых, гидроаккумулирующих электростанциях и т.п. Насосные станции (НС) являются наиболее энергоемкими потребителями, на долю которых приходится половина электроэнергии, потребляемой электроприводом (ЭП) турбомеханизмов [1]. В большинстве случаев насосные агрегаты (НА) работают в недогруженном режиме, с низкими значениями КПД, с энергетически нецелесообразными способами регулирования их параметров. Следует отметить, что насосные установки (НУ) представляют собой достаточно сложный технологический объект, к основным особенностям функционирования которых относятся: широкие диапазоны изменения рабочих параметров, обусловленные переменным во времени графиком работы потребителя; возможностью одновременной работы нескольких НА, включенных параллельно или последовательно на общую гидросеть; большой протяженностью трубопроводной системы, характеризующейся наличием противодавления в сети (до 40% номинального напора, создаваемого гидромашиной) и гидродинамического сопротивления; специфическими свойствами перекачиваемой среды (плотность, вязкость, неоднородность потока) и т.д. С учетом сказанного, для эффективной работы НС необходимы разработка и внедрение таких энергоресурсосберегающих устройств и систем регулирования режимами работы НУ, которые, учитывая перечисленные выше факторы, позволили бы повысить управляемость, энергетические показатели и надежность насосного оборудования.

В практике эксплуатации регулирование режимов работы НС может осуществляться с использованием дросселирования, ступенчатого или частотного регулирования, байпасирования и т.д.; причем каждый из методов обладает различными регулировочными возможностями и энергетическими показателями. Зачастую для обеспечения потребителя требуемыми значениями расхода и напора необходимо сочетание нескольких способов: ступенчатое регулирование с дросселированием, изменение частоты вращения колеса насоса с дросселированием и

© Т.В. Коренькова, Д.А. Михайличенко, А.М. Кравец. 2004

т.п. При этом эффективная область применения рассматриваемых вариантов определяется особенностями функционирования НС, требуемыми технологическими законами управления параметрами потребителя, стоимостными показателями регулировочного устройства и т.д.

Дроссельное регулирование изменяет подачу НС в широких пределах, однако до 30-40% потребляемой электроэнергии нерационально теряется на задвижке, при этом наблюдается значительное снижение КПД насосной установки.

Ступенчатое регулирование дает только скачкообразное изменение подачи, где подрегулирование до требуемой величины осуществляется дросселированием напорной стороны НА. Частое включение (выключение) насосов при таком способе регулирования негативно влияет на технологическое оборудование, может сопровождаться гидравлическими ударами, что нередко приводит к аварийности и сбоям в работе гидросистемы, снижению надежности работы НС.

Байпасирование, применяемое совместно с дросселированием, позволяет уменьшить подачу в систему, отбирая часть перекачиваемой жидкости из напорного водовода во всасывающий по перепускному трубопроводу. При этом циркуляция потока жидкости характеризуется непроизводительными потерями затраченной мощности. Регулирование перепуском целесообразно только для быстроходных насосов, у которых с увеличением подачи потребляемая мощность снижается.

Изменение подачи НУ частотой вращения вала двигателя насоса обладает широкими регулировочными возможностями без наличия непроизводительных потерь энергии в системе «насос-гидросеть». Максимальные значения КПД агрегата при таком регулировании изменяются незначительно – до 3-5% от номинальной величины (кривая $\eta = f(Q)$ смещается незначительно влево практически с сохранением максимальной величины) [2]. Анализ потребляемой НА энергии при различных способах регулирования производительности: ступенчатом регулировании, дросселировании, регулируемом ЭП показал, что для случая, когда водопотребление меняется во времени, минимальную величину потребляемой за год энергии, имеет метод регулирования подачи изменением частоты вращения рабочего колеса насоса. Однако, такое регулирование оказывается не всегда целесообразным для технологических установок с групповым характером нагрузки: для НС, где параллельно работают два и более агрегата диапазон регулирования частоты вращения одного из них, обеспечивающий изменение подачи насоса от максимальной величины до нуля, составляет всего 3-5% вниз от номинальной скорости [3]. Кроме того, при работе электропривода в области скоростей, близких к номинальной, регулируемый ЭП оказывается менее эффективным, чем нерегулируемый, из-за наличия потерь энергии в преобразовательных устройствах (до 5%) [3]. В этом случае применение частотно-регулируемого ЭП насоса оказывается невостребованным по своим регулировочным возможностям и является затруднительным в виду значительной стоимости преобразовательного устройства, мощность которого выбирается по установленной мощности НА.

Альтернативным техническим решением может выступать активное регулирование производительности НУ, заключающееся в отборе «лишней» части перекачиваемого потока с помощью гидротурбины, установленной в обводном трубопроводе параллельно насосу или выходной регулировочной задвижке [4]. Механическая энергия вращения колеса гидротурбины преобразуется в электрическую посредством генератора, установленного на одном валу с турбиной, которая возвращается обратно в энергосеть некоторыми потерями, обусловленными потерями в самой турбине и электромеханических звеньях. Таким образом, гидротурбина выступает в роли активного гидравлического сопротивления, обеспечивающего

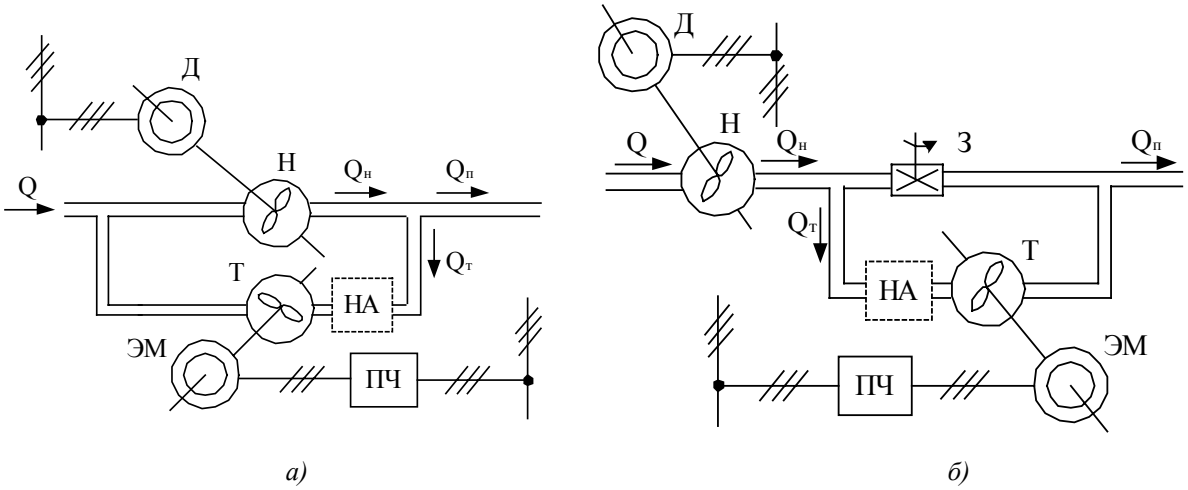
подобно дроссельной заслонке (реактивному сопротивлению с непроизводительными потерями энергии), плавное регулирование подачи НУ в требуемых пределах с одновременной рекуперацией части энергии (до 30% установленной мощности НА). Для реализации турбинного устройства целесообразно использование реактивных гидротурбин (радиально-осевых, поворотно-лопастных, ковшовых), которые характеризуются высокими значения КПД (90-95%) в широком диапазоне изменения расхода и мощности [5]. В качестве турбинного устройства могут быть использованы обратимые гидромашины, работающие как в насосном, так и турбинном режимах, что расширяет регулировочные возможности системы. Из-за колебаний нагрузки в сети потребителя необходимо регулировать мощность турбины, что осуществляется изменением степени открытия направляющего аппарата, установленного на входе турбины; изменением угла поворота лопастей рабочего колеса турбины при неизменном положении направляющих лопаток [5]; изменением частоты вращения вала турбины путем использования четырехквандрантных преобразователей частоты, обеспечивающих реверс мощности на входе и выходе энергосистемы; изменением двух различных переменных (т.н. двойное регулирование).

В работе выполнен анализ технологических и энергетических возможностей САРП НУ при работе на сеть потребителя, где в качестве турбинного устройства рассмотрены гидромашины различных типов с регулированием расхода с помощью направляющего аппарата и путем изменения частоты вращения колеса турбины. Исследования проводились для НС II-го подъема г. Кременчуга, где в работе задействованы два параллельно включенных насоса мощностью 800 кВт и 500кВт, производительностью 3200 м^3/ч и 1500 м^3/ч соответственно. Требуемый технологический диапазон изменения расхода лежит в пределах 4800-3000 м^3/ч. При регулировании параметров НС дросселированием потока на выходе НА имеют место потери напора на задвижке до 40 м и непроизводительные затраты электроэнергии, составляющие в среднем 1752000 кВт·час в год. В таких условиях, исходными параметрами для выбора гидротурбины в качестве активного регулирующего устройства являются диапазон изменения расхода в системе и потери напора, что дает возможность определить, используя [6], мощность гидроагрегата, диаметр колеса турбины, частоту вращения (табл. 1).

Таблица 1 - Технические показатели гидротурбин САРП НС

Тип турбины	Мощность, $P_т, кВт$	Напор, $H_т, м$	Расход, $Q_т, м^3/с$	Диаметр колеса, $D_т, м$	КПД, $\eta_{г.т.}$	Частота вращения, $n_{т\,опт}, об/мин$	Степень открытия напр. аппар., $a_{0\,опт.}, мм$
Радиально-осевая	192	42	0.5	0.45	0.93	1000	17.5
Поворотно-лопастная				0.28	0.9	3000	32

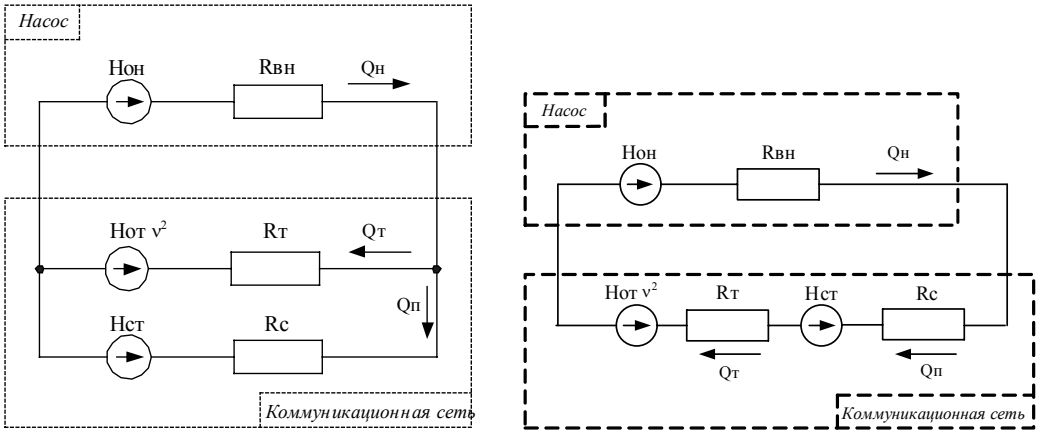
На рис. 1 приведены варианты размещения САРП в технологической схеме НС: в обводном трубопроводе параллельно насосу (рис.1, а)) и в обводном трубопроводе параллельно задвижке на выходе НА (рис.1, б)), на основании которых с учетом электромеханической аналогии происходящих в гидродинамических цепях процессов, разработаны эквивалентные схемы замещения (рис.2, а), б)).



а) *б)*

Д – электрический двигатель; Н – насос; ЭМ – электрическая машина; Т – турбина;
ПЧ – преобразователь частоты; НА – направляющий аппарат; З – задвижка;
а) – с турбиной, установленной параллельно насосу;
б) – с турбиной, установленной параллельно задвижке

Рисунок 1- Технологическая схема САРП НУ



а) *б)*

а) – с турбиной, установленной параллельно насосу;
б) – с турбиной, установленной параллельно задвижке

Рисунок 2 - Эквивалентная схема замещения системы НУ – САРП – потребитель

Напорно-расходная характеристика $H-Q$ насоса с пологими характеристиками может быть описана уравнением вида [2]:

$$H_н(Q) = H_{0н} - R_{bн}Q_н^2, \quad (1)$$

где $H_{0н}$ - напор, развиваемый насосом при нулевой подаче;

$R_{bн}$ - внутреннее сопротивление насоса, определяемое из паспортных характеристик;

$Q_н$ - производительность насоса.

$H-Q$ характеристика трубопроводной сети:

$$H_c(Q) = H_{ст} + R_cQ_п^2, \quad (2)$$

где $H_{ст}$ - статический напор (противодавление);

R_c - гидродинамическое сопротивление сети;

$Q_п$ - расход в сети потребителя.

$H-Q$ характеристика гидротурбины согласно [6] имеет вид:

$$H_т(Q) = H_{0т} \cdot \nu^2 + R_т \cdot Q_т^2, \quad (3)$$

где $H_{0т}$ - напор, развиваемый турбиной при нулевой подаче;

$Q_т$ - производительность гидротурбины;

$R_т$ - сопротивление турбины, зависящее от степени открытия направляющего аппарата α и равное для радиально-осевой турбины $\frac{R_{вт}}{\alpha}$, для поворотно-лопастной - $\frac{R_{вт}}{\alpha^3}$;

$R_{вт}$ - собственное внутреннее сопротивление гидротурбины, обусловленное конструктивными особенностями гидромашины;

$\nu = \frac{n}{n_{т.опт.}}$ - относительная частота вращения рабочего колеса турбины;

$\alpha = \frac{a_0}{a_{0\,опт.}}$ - относительное открытие направляющего аппарата турбины;

$n_{т.опт.}$, $a_{0\,опт.}$ - оптимальная частота вращения турбины и оптимальное открытие направляющего аппарата, соответствующие максимальному значению КПД гидротурбины.

Для схемы, приведенной на рис. 2, а) справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} H_{он} - H_{ст} = R_{вн} \cdot Q_н^2 + R_c \cdot Q_п^2 \\ H_{он} - H_{от} \cdot \nu^2 = R_{вн} \cdot Q_н^2 + R_т \cdot Q_т^2 \\ Q_н = Q_т + Q_п \end{cases}. \quad (4)$$

Решая (4), получим зависимость производительности насоса, турбины и расхода в сети потребителя от степени открытия направляющего аппарата и скорости вращения рабочего колеса турбины:

$$Q_н = \sqrt{\frac{H_{он}(1 - h_2 \cdot \nu^2)}{R_{вн}(1 + \rho_2 \cdot \sigma^2)}}; \quad (5)$$

$$Q_т = \sigma \cdot \sqrt{\frac{H_{он}(1 - h_2 \cdot \nu^2)}{R_{вн}(1 + \rho_2 \cdot \sigma^2)}}; \quad (6)$$

$$Q_п = (1 - \sigma) \cdot \sqrt{\frac{H_{он}(1 - h_2 \cdot \nu^2)}{R_{вн}(1 + \rho_2 \cdot \sigma^2)}}; \quad (7)$$

где $\sigma = \frac{-\rho_1 \cdot (1 - h_2 \cdot \nu^2)}{\rho_2 \cdot (1 - h_1) - \rho_1 \cdot (1 - h_2 \cdot \nu^2)} + \frac{\sqrt{(\rho_1 \cdot (1 - h_2 \cdot \nu^2))^2 - (\rho_2 \cdot (1 - h_1) - \rho_1 \cdot (1 - h_2 \cdot \nu^2)) \cdot (-h_1 - \rho_1 + h_2 \cdot \nu^2 \cdot (1 + \rho_1))}}{\rho_2 \cdot (1 - h_1) - \rho_1 \cdot (1 - h_2 \cdot \nu^2)}$;

$$h_1 = \frac{H_{ст}}{H_{он}};\ h_2 = \frac{H_{от}}{H_{он}};\ \rho_1 = \frac{R_c}{R_{вн}};\ \rho_2 = \frac{R_т}{R_{вн}}.$$

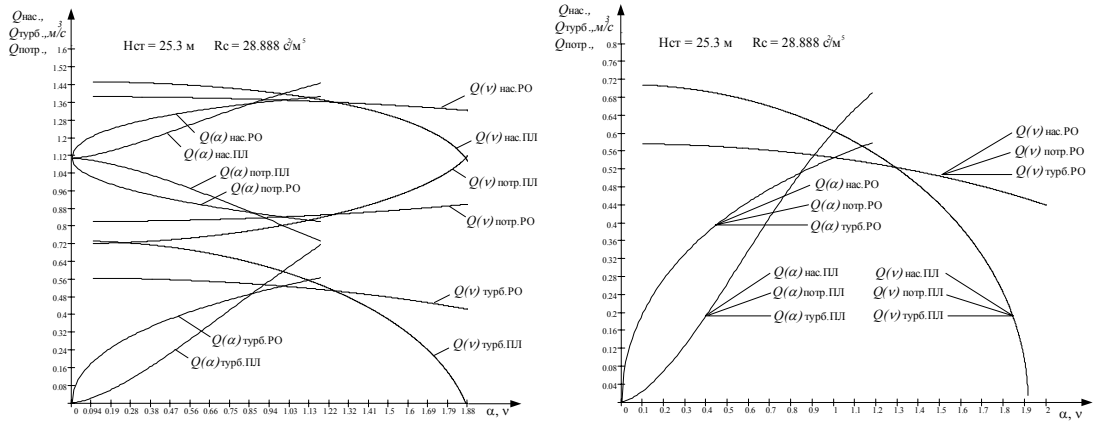
Для схемы, приведенной на рис. 2, б), система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} H_{он} - H_{от} \cdot \nu^2 - H_{ст} = R_{вн} \cdot Q_н^2 + R_т \cdot Q_т^2 + R_с \cdot Q_п^2 \\ Q_н = Q_т = Q_п \end{cases}; \quad (8)$$

Решая (8), получим:

$$Q_н = Q_т = Q_п = \sqrt{\frac{H_{он} - H_{от} \cdot \nu^2 - H_{ст}}{R_{вн} + R_т + R_с}} . \quad (9)$$

На рис.3 приведены зависимости изменения подачи насоса, турбины и расхода в сети потребителя с параметрами $H_{ст} = 25.3$ м, $R_с = 28.888$ с^2/м^5 при регулировании мощности турбины степенью открытия направляющего аппарата и частотой вращения вала гидротурбины.



а) *б)*

а) – с турбиной, установленной параллельно насосу;
б) – с турбиной, установленной параллельно задвижке

Рисунок 3- Зависимость изменения производительности на выходе насоса, гидротурбины и расхода в сети при использовании радиально-осевой (РО) или поворотно-лопастной (ПЛ) гидротурбин и различных способах регулирования ее мощности

Мощность, подводимая к валу насоса, равна [2]:

$$P_н = A_3 Q_н + B_3 Q_н^2 + D_3 . \quad (10)$$

КПД насоса:

$$\eta_н = \frac{P_п}{P_н} = \frac{\rho g}{1000} \frac{A_2 Q_н + B_2 Q_н^2 + C_2 Q_н^3}{A_3 Q_н + B_3 Q_н^2 + D_3} , \quad (11)$$

где $A_2, B_2, C_2, A_3, B_3, D_3$ - коэффициенты аппроксимации насоса, зависящие от конструктивных особенностей турбомеханизма и определяемые по паспортной характеристике насоса [2];

ρ - плотность жидкости;

g - ускорение свободного падения.

Энергетические показатели гидротурбины с достаточной степенью точности могут быть описаны выражениями:

- КПД гидротурбины

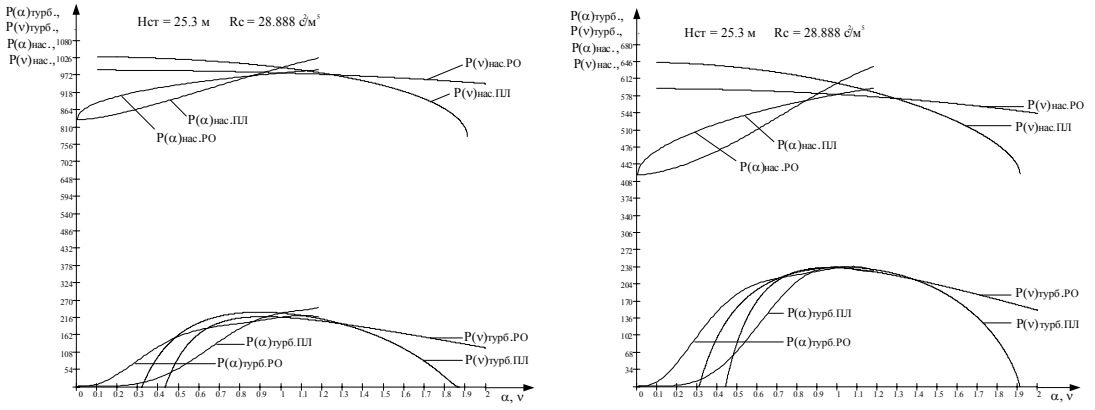
$$\eta_m = A_{2m}(\alpha) + B_{2m}(\alpha) \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\nu}} \cdot \sqrt[4]{Q_m} + C_{2m}(\alpha) \cdot \frac{1}{\sqrt{\nu}} \cdot \sqrt{Q_m} + D_{2m}(\alpha) \cdot \frac{1}{\nu} \cdot Q_m + E_{2m} \cdot \frac{1}{\nu^2} \cdot Q_m^2 ; \quad (12)$$

- мощность турбины

$$P_m = \frac{\rho \cdot g}{1000} \cdot H_m \cdot Q_m \cdot \eta_m , \quad (13)$$

где $A_{2m}(\alpha), B_{2m}(\alpha), C_{2m}(\alpha), D_{2m}(\alpha), E_{2m}(\alpha)$ - коэффициенты аппроксимации турбины [6].

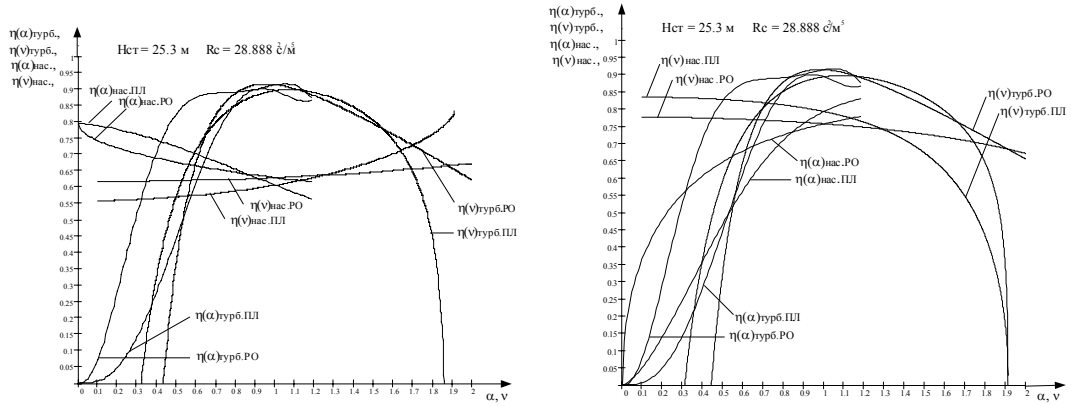
Подставив (5)-(7), (9) в выражения (10)-(13), получим зависимости изменения мощности, потребляемой насосом, мощности гидротурбины, КПД насоса и КПД гидротурбины при регулировании производительности НУ активным дросселем на базе радиально-осевой или поворотно-лопастной гидротурбин с различными способами отбора ее мощности (рис. 4, 5).



а) *б)*

а) – с турбиной, установленной параллельно насосу;
б) – с турбиной, установленной параллельно задвижке

Рисунок 4 - Зависимость изменения мощности насоса и гидротурбины при использовании радиально-осевой (РО) или поворотно-лопастной (ПЛ) гидротурбин и различных способах регулирования ее мощности



а) *б)*

а) – с турбиной, установленной параллельно насосу;
б) – с турбиной, установленной параллельно задвижке

Рисунок 5 - Зависимость изменения КПД насоса и гидротурбины при использовании радиально-осевой (РО) или поворотно-лопастной (ПЛ) гидротурбин и различных способах регулирования ее мощности

Анализ проведенных исследований позволил заключить следующее:

- системы активного регулирования параметров насосных установок являются альтернативным вариантом повышения управляемости, экономичности и надежности НС большой мощности с групповым характером нагрузки и меняющимся во времени режимом работы. В качестве активных регулировочных устройств могут быть использованы как гидротурбины, так и обратимые гидромашины, установленные в технологической схеме насосного комплекса в обводном трубопроводе параллельно насосу или параллельно выходной регулировочной задвижке;

- сравнительный анализ использования турбинных устройств в САРП показал, что поворотно-лопастные гидротурбины обладают более высокой пропускной способностью: при регулировании мощности турбины изменением степени открытия направляющего аппарата (при вращении с оптимальной частотой) диапазон изменения расхода поворотно-лопастной турбины приблизительно на 20% шире, чем радиально-осевой; при регулировании мощности частотой вращения вала турбины $\nu = 0 \div 1.85$ (при оптимальном открытии направляющего аппарата), диапазон изменения расхода лежит в пределах $Q = 0.73 \div 0$ м^3/с для поворотно-лопастной и $Q = 0.56 \div 0.44$ м^3/с для радиально-осевой гидротурбины;
- максимальные величины КПД радиально-осевой и поворотно-лопастной гидротурбин близки и изменяются в пределах 3-4%, однако, энергетическая характеристика поворотно-лопастной гидромашины является более пологой. В связи с этим, если по технологическим условиям работы мощность гидротурбины должна меняться в широких пределах, то целесообразнее использовать поворотно-лопастные гидротурбины, у которых при изменении нагрузки КПД меняется незначительно (до 10%); при работе с мало меняющейся нагрузкой предпочтительнее использовать более простые радиально-осевые гидротурбины;
- установка турбинного устройства параллельно дроссельной заслонке на выходе НА позволяет реализовать в 2 раза больший диапазон регулирования производительности, чем при размещении турбины в обводном трубопроводе параллельно насосу;
- предлагаемые системы активного регулирования параметров НУ кроме решения технологической задачи регулирования расхода или давления в трубопроводной сети, могут решать проблемы, связанные с гидрозащитой НС от недопустимого превышения давления или резкого снижения производительности до нуля на выходе гидромашины, вызванные аварийными режимами работы оборудования (внезапным отключением электропитания насосов, резким закрытием задвижек, пуском или остановом турбомашин и т.п.). Технические решения, предложенные в [7], позволяют повысить эффективность НС, сэкономить затраты на ликвидацию последствий аварийных режимов, повысить надежность функционирования всего технологического комплекса.

Список литературы

1. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М., Энергия, 1972, 240с.
2. Коренькова Т.В. Описание характеристик насосных агрегатов при переменной скорости вращения/Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 1(12). –Кременчук: КДПУ, 2002, -С.184-189.
3. Коренькова Т.В., Курбанова И.Г. Рациональные системы электропривода групповых насосных установок/Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. – Вип. 2(19). –Кременчук: КДПУ, 2003, –С.30-35.
4. Коренькова Т.В., Перекрест А.Л. О коррекции энергетики группового электропривода насосов активными регулировочными устройствами / Вісник Національного технічного університету ХПІ: Зб. наук. пр. ХДПУ. – Вип.12, т.2 – Харків: ХДПУ, 2002, С.514-516.
5. Кривченко Г.И. Насосы и гидротурбины. М.-Энергия. 1970.-488с.
6. Коренькова Т.В., Перекрест А.Л., Михайличенко Д.А., Кравець А.М. Характеристики гидротурбины в системе активного регулирования производительности насосных станций/Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. –Вип. 2(25). – Кременчук: КДПУ, 2004, -С.21-27.
7. Гидроэнергетические установки (гидроэлектростанции, насосные станции и гидроаккумулирующие электростанции) под ред. Д.С. Щавелева. –Л.:Энергоиздат, 1981. –517с.
8. Михайличенко Д.А., Коренькова Т.В. К созданию систем управления насосными станциями при аварийных режимах работы/Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Зб. наук. пр. КДПУ. –Вип. 3(26). –Кременчук: КДПУ, 2004, -С.50-56.

УДК 621.313

В.В. Заквасов, А.А. Морозов, А.В. Прилипко
Кременчугский государственный политехнический университет
Т.В. Величко
Криворожский технический университет

Комплекс для исследования энергопроцессов в электромеханических системах

В статье рассмотрены вопросы создания измерительно-диагностического комплекса для изучения процессов преобразования энергии, анализа качества потребляемой и преобразуемой энергии, его структура и возможности.
измерительно-диагностический комплекс, мгновенная мощность, энергетические процессы

Возможности современных средств вычислительной техники позволяют решить самые сложные вопросы управления электромеханическими системами, их защиты к автоматизации. Современные системы самого разнообразного технологического применения и использования включают в себя качественный и интеллектуальный электропривод с преобразователями энергии, отвечающими самым разнообразным требованиям, электрические машины разнообразного исполнения, коммутирующие и защитные устройства с набором необходимых защитных функций. Развитие электромеханических систем возможно с учетом сложных в математическом отношении энергетических процессов, протекающих в цепях их преобразования: в электрической цепи; в электрических контурах; в цепях, которые формируют электромагнитный момент; в узлах кинематических передач, начиная с вращающегося ротора, подшипников, соединительных муфт и т.п.

Структура уравнений, описывающих процессы преобразования энергии во всех звеньях электромеханической системы, достаточно сложна; изучение этих процессов возможно на реальных физических объектах, обеспечивающих получение сложной информации в режимах работы всех узлов. При этом, следует иметь ввиду то обстоятельство, что единственным уравнением, связывающим воедино узлы электромеханической системы с разными принципами энергопреобразования является уравнение энергобаланса, представленное в форме мгновенных значений мощности: электрической на сопротивлениях, электромагнитной на индуктивностях, механической в кинематических узлах, динамической на инерционностях вращающихся частей машины.

Очевидно, что изучение этих процессов в форме простейших представлений должно осуществляться в общетехнических курсах; энергетика же всего комплекса электромеханической системы должна исследоваться в полном объеме на экспериментальном оборудовании с полным перечнем физических устройств.

Анализ вопроса показал, что этим требованиям отвечает простейший электромеханический комплекс, состоящий из нескольких электрических машин в сочетании с преобразовательными устройствами соответствующего назначения, интегрированными с измерительно-управляющей частью на базе современного промышленного или персонального компьютера. В зависимости от специфических требований, которые могут возникать, могут меняться электрические машинные, преобразовательные устройства, коммутирующаяся аппаратура; структура же комплекса для получения информации, ее обработка остаются неизменной. Такой

© В.В. Заквасов, А.А. Морозов, А.В. Прилипко, Т.В. Величко. 2004

подход позволяет строить подобные комплексы с ориентацией их использования при изучении процессов, характерно отражающих проблемы более полутора десятков дисциплин электромеханической и электроэнергетической направленности.

Направление создания измерительно-диагностических комплексов хорошо известно. Предлагаемые результаты исследований касаются комплексов для изучения процессов преобразования энергии, анализа показателей качества потребляемой и преобразуемой энергии. Полученные результаты могут быть использованы при создании лабораторных комплексов фундаментальных дисциплин по энергоресурсосбережению, энергоменеджменту, энергомониторингу и т. п.

Структура комплексов позволяет выполнить исследования в таких направлениях:

- исследование характеристик двигателей переменного и постоянного тока;
- исследование статических, несимметричных и аварийных режимов;
- исследование энергетических режимов преобразователей электрических машин, системы в целом по показателям мгновенной мощности;
- реализация замкнутых систем управления электроприводами;
- исследования систем цифрового управления вентильными преобразователями;
- определение показателей качества электроэнергии;
- определение показателей качества преобразования энергии электрическими машинами.

Структурная схема одного из вариантов комплекса представлена на рисунке 1.

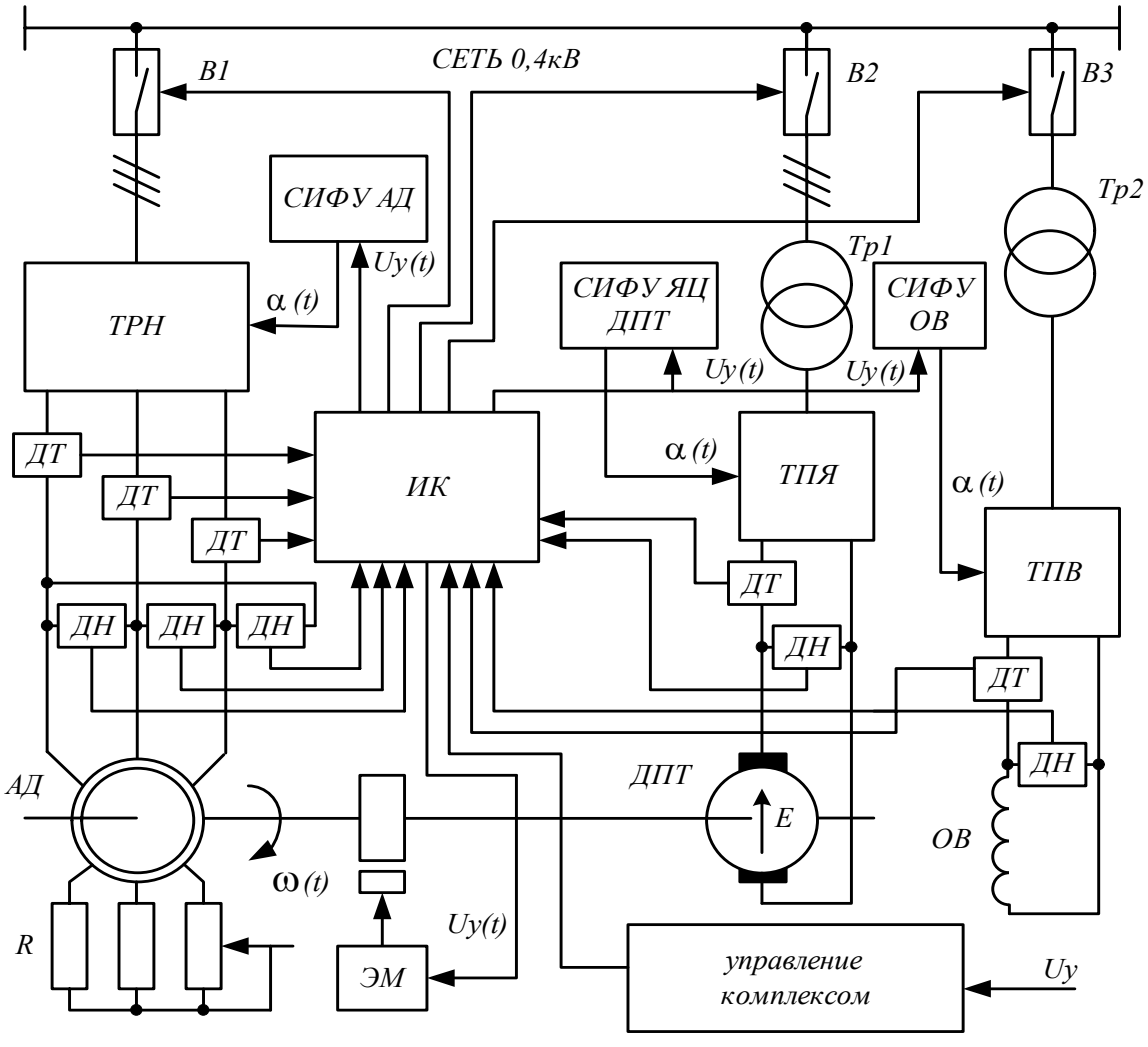


Рисунок 1 - Структурная схема измерительно-диагностического комплекса

Ядром комплекса является ЭВМ, которая, с помощью соответствующего программного обеспечения выполняет работу по обработке полученных данных и приведения их к виду удобному для исследований.

Измерительная часть комплекса состоит из блока измерительных датчиков (БИД), который в свою очередь разбит на 3 блока:

– БИД1 включает в себя 3 датчика тока и напряжения, которые находятся в цепях питания асинхронного двигателя;

– БИД2 и БИД3—датчики тока и напряжения в якорной цепи, и в цепи возбуждения двигателя постоянного тока.

Выходы датчиков через канал связи с соединены с аналогово-цифровым преобразователем (АЦП).

Преобразование аналоговых сигналов с датчиков тока, напряжения в цифровую форму осуществляет аналого-цифровой преобразователь ADC-7892, который является функционально-полным комплексом, включающий в себя многоканальный 10-ти разрядный аналого-цифровой преобразователь. Плата ADC-7892 выполнена в стандарте IBM/PC AT и устанавливается в любой свободный разъем ISA шины, расположенный непосредственно в компьютере. Выбор текущего канала измерения производится входным мультиплексором, который программно может коммутировать 8 входных линий на вход последующего дифференциального усилителя. Усиленный сигнал преобразовывается АЦП. Результат преобразования в цифровой форме передается непосредственно в память персонального компьютера через шину данных. При этом компьютер управляет платой АЦП и производит сбор массива данных по требуемым каналам измерений, задавая поочередно адрес требуемого входного канала, коэффициента усиления, и формирования запускающего стартового сигнала начала цикла преобразования для АЦП. Связь платы АЦП с ПК через шину ISA обеспечивает высокое быстродействие системы, и, соответственно, общее время преобразования будет состоять из времени инициализации, непосредственного преобразования АЦП и этапа передачи данных через внутрисистемную шину данных.

Построение по такому принципу ИК обеспечивает полную автоматизацию цикла измерений, а также защиту автоматизированной работы компьютера с оборудованием.

Основное назначение модуля БИД является преобразование входных измеряемых величин в эквивалентный аналоговый сигнал и позволяет измерять по трем независимым каналам линейные или фазные напряжения и токи цепей переменного тока.

Дополнительно в БИД заложена функциональная возможность измерения по четырем независимым каналам низковольтных сигналов без гальванической развязки цепей, формирования аналогового сигнала управления; обеспечивать гальваническую развязку между силовыми и выходными цепями блока измерительных датчиков, масштабировать выходные сигналы к допустимому диапазону входного сигнала АЦП.

Измерение низковольтных сигналов без гальванической развязки осуществляется через блок согласующих усилителей (БСУ), который обеспечивает масштабирование входных сигналов до уровня необходимого для АЦП.

В состав БСУ входит четыре независимых канала, выполненных на блоках операционных усилителей, каждый из которых выполняет масштабирование сигнала по своему каналу прохождения измеряемого сигнала. Выходные сигналы БСУ выведены из БИД четырех канальной линией и подаются на вход платы АЦП.

Измерительный комплекс, при использование соответствующего математического аппарата, дает возможность:

– получать мгновенные значения токов и напряжений;

– производить гармонический анализ и получать составляющие измеренных величин;

– формировать момент на валу двигателя без вспомогательных машин (динамическое нагружение, квазичастотное управление, и т.д.);

– упростить использование вычислительной техники в составе ИДК позволяет исключить дорогостоящие осциллографы, регистрирующую аппаратуру, анализаторы спектра, фазовые дискриминаторы и т.д. При этом характеристики, получаемые экспериментальным и расчетным путем, обладают большей информативностью;

– осуществить исследование АД с учетом процессов преобразования мощности, позволяет получить полную энергетическую картину электродвигателя, определить его параметры, температуру его обмоток, степень несимметрии конструкции, качество потребляемой электроэнергии;

– при использовании разработанных методик определить потери в стали, степень ее насыщения;

– по диагностическим признакам определить характер и причины вибраций, разрушительно действующих на конструкцию двигателя.

Включение ЭВМ в состав измерительного комплекса дает возможность наблюдения величин, определение которых в других случаях затруднительно и требует дополнительного оборудования: тахогенераторов, динамометров для измерения момента и мощности на валу и существенно снижает затраты времени.

Особый интерес вызывает возможность исследования преобразований мгновенной мощности в цепях электродвигателей подсоединенных к источнику полигармонического питания.

Исследования показывают, что мгновенная мощность на отдельно взятых элементах комплекса представляется таким образом:

$P_u(t) = U(t) \cdot I(t)$ - мгновенная мощность источника питання;

$P_R(t) = I^2(t) \cdot R$ - мгновенная мощность сопротивления;

$P_L(t) = I(t) \cdot \dfrac{d}{dt}\{L(t) \cdot I(t)\}$ - мгновенная мощность на индуктивности;

$P_j(t) = J \cdot \dfrac{d\omega}{dt}\omega(t)$ - мгновенная мощность вращающегося ротора;

$P_M(t) = M_c(\omega) \cdot \omega(t)$ - мгновенная мощность вращающегося ротора и муфты;

$P_C(t) = C \cdot \left\{\dfrac{dB(t)}{dt}\right\}^2$ -мгновенная мощность потерь в электротехнической стали при индукции $B(t)$ в отдельно взятом элементе.

На основании зпакона сохранения равенства, мощности источника с одной стороны к мощности в отдельных элементах – с другой:

$$P_u(t) = P_R(t) + P_L(t) + P_j(t) + P_m(t) + P_C(t) \qquad (1)$$

Так как любая из зависимостей $U(t), I(t), \omega(t), B(t)$– может быть представлена в форме рядов Фурье или других аппроксимационных зависимостей, то уравнение баланса можно представить в форме уравнения для каждой из имеющихся в разложениях гармоник:

$$P_{OU} = P_{OR} + P_{OL} + P_{Oj} + P_{OM} + P_{OC};$$

$$\sum_{k=1}^{m+n} P_{akU} = \sum_{k=1}^{m+n} P_{akR} + \sum_{k=1}^{m+n} P_{akL} + \sum_{k=1}^{m+n} P_{akj} + \sum_{k=1}^{m+n} P_{akM} + \sum_{k=1}^{m+n} P_{akC};$$

$$\sum_{k=1}^{m+n} P_{bkU} = \sum_{k=1}^{m+n} P_{bkR} + \sum_{k=1}^{m+n} P_{bkL} + \sum_{k=1}^{m+n} P_{bkj} + \sum_{k=1}^{m+n} P_{bkM} + \sum_{k=1}^{m+n} P_{bkC};$$

$$k = m - n, m \neq n;$$

$$k = m + n,$$

где m,n – порядок гармонических компонент, произведение которых образуют соответствующий характер мощности.

Исследованиями установлено, что периодическое изменение во времени углов управления тиристорного регулятора позволяет сформировать гармоники низкочастотного диапазона, охватывающего справа и слева сетевую частоту. Частота периодического сигнала управления (помимо постоянной составляющей) должна соответствовать требуемой частоте низкочастотной составляющей напряжения питания (2÷5Гц). В этом диапазоне тиристорный регулятор формирует практически без частотных искажений гармонику низкой частоты [4].

Аналогичный результат может быть получен при подаче на вход системы управления сигнала пилообразной формы длительностью, сравнимой с периодом сетевого напряжения. Так при подаче пилообразного сигнала с периодом частоты 49Гц, на выходе регулятора кроме всех прочих гармоник будем иметь гармонику с периодом сигнала 1Гц. При управляющем сигнале, например, 55Гц на выходе получаем сигнал 5Гц, но порядок чередования фаз будет отличаться от того, какой получается при сигнале частотой 45Гц. Эти свойства регуляторов напряжения, отмеченные в [4], позволяют существенно упростить систему формирования полигармонического сигнала.

Возможности устройств для формирования специальных сигналов в системах регуляторов постоянного или переменного тока существенно увеличиваются при использовании силовых полностью управляемых вентильных элементов или силовых запираемых тиристоров.

При этом представляется возможным задавать требуемые соотношения между амплитудами гармоник напряжения и их числом. В связи с тем, что выходные напряжения формируются из компонент кривых напряжения питания, то при использовании полностью управляемых вентильных элементов не представляется возможным исключить высокочастотные составляющие напряжения на выходе.

Список литературы

1. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и послеремонтной диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях, М., Недра, 1991. - 241с.
2. Такеути Т. Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей, Л., Энергия, 1973. - 248с.
3. Маевский О.А. Интегральные методы определения энергетических показателей вентильных преобразователей, М., Энергия.-320с.
4. Родькин Д.И., Давидкович В.М., Алистратенко Ю.В. Оценка эффективности систем динамического нагружения асинхронных двигателей, Электротехника, №1, 1994. - С. 47-52.

УДК 621.313.333

В.А. Огарь
Кременчугский государственный политехнический университет

К определению насыщения электротехнической стали асинхронных двигателей

В работе выполнены исследования по определению насыщения электротехнической стали асинхронных двигателей. Сформулирована и решена локальная задача по определению степени насыщения для катушки со сталью на базе экспериментальной установки, представляющей собой измерительно-диагностический комплекс. Показано, что степень насыщения целесообразно связать с коэффициентом искажения тока. Введение этого показателя позволяет визуально отображать картину изменения параметров асинхронного двигателя в процессе насыщения.
насыщение стали, коэффициент искажения тока, измерительно-диагностический комплекс, асинхронный двигатель, потери в стали, кривая намагничивания

Высокие динамические показатели, надежность в эксплуатации, относительная дешевизна обусловили широкое применение машин переменного тока в различных отраслях народного хозяйства. В связи с этим первостепенной является проблема повышения ресурса электрических машин, как задействованных непосредственно в технологическом процессе, так и прошедших стадию ремонта. Современные методы послеремонтной диагностики асинхронных машин при определении «нового» паспорта двигателя не в полной мере учитывают физические явления, протекающие в машине (вытеснение тока в роторе, насыщение стали, увеличение потерь от вихревых токов и др.). Анализ энергетических процессов при диагностике и паспортизации двигателей, выполненный в работах [1-3], показал, что рост греющих потерь (потерь в стали), в большей степени обусловлен явлением насыщения, что в результате приводит к перегреву изоляции обмоток машины, уменьшению его нагрузочной способности и, соответственно, к преждевременному выходу из строя.

Нелинейные свойства индуктивного сопротивления контура намагничивания асинхронного двигателя являются причиной сложного гармонического состава кривой тока, что, в свою очередь, связано с нелинейной зависимостью кривой намагничивания, которая характеризует степень насыщения машины [4].

Сложность определения явления насыщения связана с тем, что не существует приборов и методов, с помощью которых можно было бы произвести измерения и однозначно говорить о том, на каком участке кривой намагничивания двигатель находится в данном режиме работы. До сих пор при решении задач электромеханики учет насыщения проводился косвенными методами [5], базирующимися на математическом описании кривой намагничивания стали, которая закладывается заводом - изготовителем. Однако, после ремонта этот аппарат является непригодным, так как свойства электротехнической стали изменяются, снижается угол наклона кривой в начальной области намагничивания, и, соответственно, уменьшается величина индукции насыщения [6], что усложняет процесс аналитического описания кривой намагничивания.

В связи с вышеизложенным, основной целью работы является определение показателей насыщения электротехнической стали, которые адекватно отображают процессы, протекающие в электрической машине.

Для упрощения анализа поведения асинхронного двигателя в режиме

© В.А. Огарь. 2004

насыщения была сформулирована и решена локальная задача по определению степени насыщения для катушки со сталью на базе экспериментальной установки, представляющей собой измерительно-диагностический комплекс, структурная схема которого приведена на рис.1. Особенность этого оборудования в том, что измеряемые сигналы представлены в цифровой форме, что удобно для последующей их математической обработки [7].

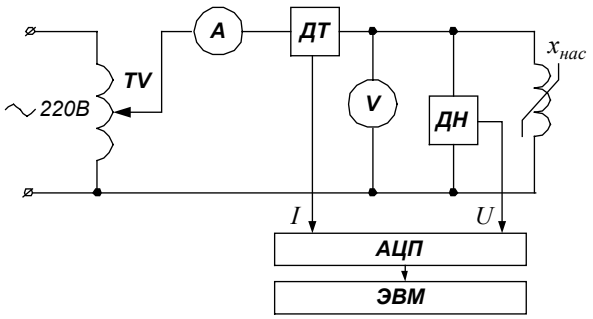


Рисунок 1 - Структурная схема исследуемой установки

В состав лабораторного комплекса входят: понижающий автотрансформатор TV, предназначенный для формирования необходимого уровня напряжения (в диапазоне от 2÷23 *В*); датчик тока ДТ типа LA25NP, базирующийся на эффекте Холла и позволяющий измерять ток, протекающий по обмоткам исследуемой катушки; датчик напряжения ДН, в качестве которого используется измерительный трансформатор для замера напряжения, подающегося на катушку; аналого-цифровой преобразователь АЦП типа L780, с разрядностью 14 бит и максимальной частотой преобразования 400 кГц, а также стрелочные приборы амперметр и вольтметр, предназначенные для визуального контроля измеряемых величин. К установке подключается исследуемая катушка, с параметрами: активное сопротивление $R = 0.02235 Ом$; индуктивность в ненасыщенном состоянии $L = 0.0204 Гн$. Сигналы с датчиков электрических величин через аналого-цифровой преобразователь поступают на ЭВМ, где с помощью специального программного обеспечения производится их дальнейшая обработка.

Экспериментально снятые кривые тока представлены на рис.2,

где: 1 – $U = 8{,}2 B$ при этом амплитуда тока равна $I_m = 1.675 A$; 2 - $U = 12.9 B$, $I_m = 2.814 A$; 3 - $U = 18 B$, $I_m = 4.779 A$; 4 - $U = 20.8 B$, $I_m = 8.656 A$.

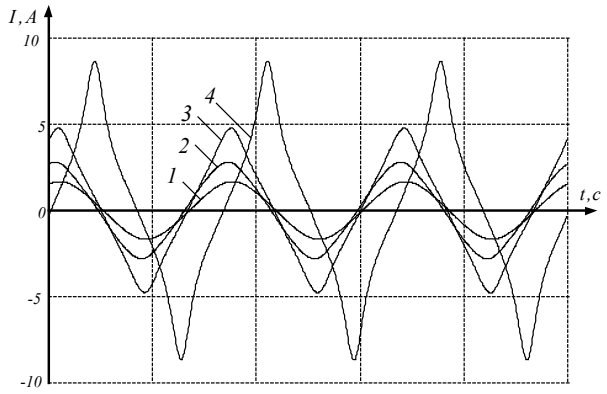


Рисунок 2 - Зависимости тока, протекающего по обмоткам катушки для разных уровней напряжения

Из графика видно, что с увеличением напряжения растет как амплитуда сигнала,

так и уровень его несинусоидальности, что говорит о насыщении катушки. Следовательно, имеет смысл связать насыщение и увеличение потерь в стали, которое при этом наблюдается, с коэффициентом искажения синусоидальности кривой тока. Согласно [8], коэффициент искажения рассчитывается по формуле:

$$k_{isk} = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=1}^{\infty} I_\nu^2}}{I_1}. \qquad (1)$$

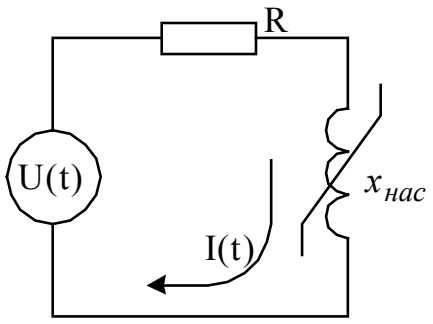


Рисунок 3 - Схема замещения катушки со сталью

Для катушки, используемой в лабораторной установке, по схеме замещения (рис.3) рассчитаем потери в стали

$$P_c = \frac{1}{T}\int_0^T U(t)\cdot I(t)dt - \frac{1}{T}\int_0^T I^2(t)\cdot R\cdot dt, \quad (2)$$

где $T = 0{,}02\,c$ - период измерений.

Значения потерь в стали, коэффициента искажения тока для разных уровней напряжения сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - К расчету параметров исследуемой схемы

Экспериментальные данные		Расчетные данные	
U, B	I_m, A	P_c, Bm	k_{isk}
2.05	0.456	0.076	1.03734
3.8	0.801	0.279	1.02781
5.5	1.1303	0.602	1.02174
7.4	1.528	0.927	1.02806
8.2	1.675	1.324	1.02617
9.6	1.923	1.441	1.03561
12.9	2.814	3.419	1.06297
14.1	3.196	4.033	1.07992
15	3.466	4.515	1.09295
18	4.779	5.653	1.16353
20.4	7.785	8.017	1.34937
20.8	8.656	8.422	1.40931
21.6	10.931	9.564	1.52591
23	20.668	14.077	1.74401

Анализ зависимости, приведенной на рис. 4 показал, что потери в стали P_c при увеличении коэффициента искажения тока k_{isk} возрастают. Причем существует участок, на котором при малом изменении коэффициента искажения наблюдается резкий рост потерь в стали, что объясняется неустойчивой работой катушки на промежутке явновыраженного насыщения стали, а также возможной аварийностью работы и выходе ее из строя.

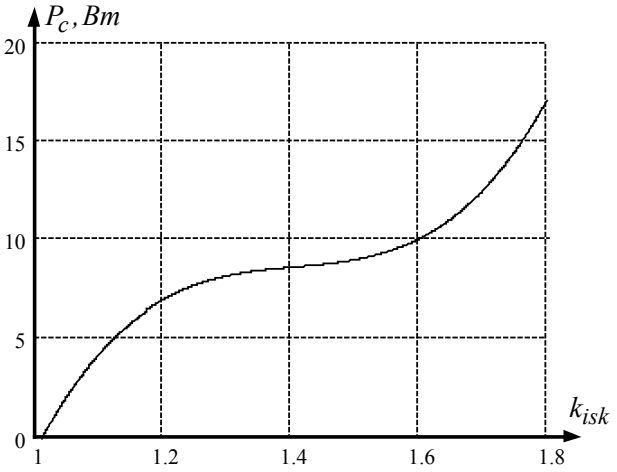


Рисунок 4 - Зависимость потерь в стали от коэффициента искажения тока

Графическую зависимость потерь в стали от введенного показателя искажения тока k_{isk} (рис.4) с достаточной степенью точности можно описать регрессионной моделью, имеющей вид кубического полинома:

$$P_c = a + b \cdot k_{isk} + c \cdot k_{isk}^2 + d \cdot k_{isk}^3 , \quad (3)$$

где $a = -331.435$; $b = 719.285$; $c = -509.239$;

$d = 120.661$ - коэффициенты аппроксимации.

Подытожив вышесказанное, следует отметить, что одним из показателей, описывающих насыщение стали является коэффициент искажения тока. Преимуществом такого подхода является возможность определения состояния работы нелинейного элемента по протекающему через него току. Введение этого показателя позволяет визуально отображать картину изменения параметров асинхронного двигателя в процессе насыщения.

Список литературы

1. Родькин Д.И., Черный А.П, Мартыненко В.А., Тараненко С.И., Барвинок Д.В., Гераськин А.С. Исследование степени насыщения стали асинхронного двигателя. Вестник КДПУ, 1/2003, с.68-75.
2. Родькин Д.И. Результаты исследований по диагностике параметров асинхронных двигателей при полигармоническом их питании. Вестник КДПУ, 1/2001, с.274-280
3. Родькин Д.И., Черный А.П. К определению послеремонтной работоспособности асинхронных двигателей. Вестник КДПУ, 2/2001, с. 40-47.
4. Родькин Д.И., Мартыненко В.А., Барвинок Д.В., Гераскин А.С. Энергопроцессы в асинхронном двигателе с насыщенной сталью. Вестник КДПУ, 1/2002, с. 174-180.
5. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоиздат, 1981, 184с.
6. Прус В.В Процесс старения электротехнической стали электродвигателей переменного тока во время работы, Вестник КДПУ, 1/1998.
7. Родькин Д.И., Здор И.Е., Барвинок Д.В. Особенности испытаний, диагностики и паспортизации асинхронных двигателей при использовании компьютеризированных измерительно-диагностических комплексов. Вестник КДПУ, 2/2001, с.70-72.
8. ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Киев, Госстандарт Украины, 1999.

УДК 681.518.54

А.Ю. Ряшенцев
Кременчугский государственный политехнический университет

Автоматизация процесса диагностики электротехнической стали асинхронных двигателей

Работа посвящена разработке автоматизированного измерительно-диагностического комплекса, для диагностирования активной стали статоров асинхронных двигателей. Актуальность темы обусловлена необходимостью обеспечения автоматизированного процесса до, и послеремонтной диагностики активной стали статоров асинхронных двигателей. В статье описывается лабораторный комплекс, позволяющий исследовать состояние активной стали статора на локально поврежденных участках по всей поверхности зубцовой зоны пакета статора АД. Процесс диагностики стали, производится в автоматизированном режиме.
измерительно-диагностический комплекс, активная сталь статора, зубцовая зона, индукционный датчик, продольное перемещение, угловое перемещение

По результатам, оценки работ по проведению ремонтов электрических машин, 50% ЭМ выходят из строя по причине пробоя статорных обмоток. В процессе ремонта эти обмотки демонтируются путем вырубки (у двигателей малой мощности) или обжига. Самым уязвимым местом ЭМ при ремонте в плане изменения своих свойств является электротехническая сталь, пакет которой подвергается тепловым и механическим воздействиям, что в конечном счете приводит к изменению ее характеристик. Определение реальных потерь в стали, перед перемоткой, позволит выработать критерии отбраковки статоров до укладки обмоток.

На сегодняшний день, преимущественно из-за сложившейся экономической ситуации, предприятия Украины и бывших стран СНГ вынуждены эксплуатировать асинхронные двигатели, которые неоднократно подвергались капитальному ремонту. Существующая статистика подтверждает снижение срока службы отремонтированных асинхронных двигателей с ростом числа ремонтов [1]. Анализируя процесс ремонта и послеремонтной эксплуатации для данного типа электрических машин, можно отметить, что резкое снижение их надежности в результате ремонтов нельзя объяснить плохим качеством применяемых обмоточных материалов и несущественной модернизацией обмоточных данных статора.

Из этого можно сделать вывод, что проведения качественных и достоверных испытаний активной стали сердечника на пригодность к дальнейшей эксплуатации, очень целесообразно и экономично при выполнении ремонта электрических машин. В особенности если ремонтные работы проводятся массово, на ремонтных предприятиях или в ремонтных цехах.

С целью ускорить процесс ремонта и улучшить его качество, а также определить электрическую машину, активная сталь которой имеет значительные отклонения от рабочих свойств электротехнической стали (ЭТС) и непригодна для дальнейшей эксплуатации, тем самым избежать бесполезных затрат, необходимо проводить исследования по диагностике качества ЭТС.

Исходя из того, что наибольшие изменения свойств электротехнической стали, наблюдаются в верхней части зубцов пакета статора, а они могут быть выявлены, только при помощи локального метода тестирования стали.

Автоматизация ускорит процесс диагностики электрических машин и облегчит трудоемкую работу оператора по локальному позиционированию измерительного

© А.Ю. Ряшенцев. 2004

датчика на активную сталь статора двигателя. Причем критериями для создания необходимой конструкции являются универсальность (возможность переналадки для тестирования статоров различной конструкции в пределах определённого ряда мощностей двигателей) точность позиционирования датчика и сравнительная простота в изготовлении.

Основной задачей является, разработка автоматизированного измерительно-диагностического комплекса для определения свойств электротехнической стали асинхронных двигателей.

Для создания лабораторного комплекса необходимо выполнить следующие задачи:

- проектировать, механическую конструкцию позволяющую: удобно устанавливать статоры различной величины (в пределах ряда мощностей) и осуществлять позиционирование измерительного датчика в автоматизированном режиме,
- подобрать управляющие автоматическими режимами двигатели и создать систему управления,
- выбрать методику регистрации и обработки полученных показателей магнитных свойств стали.

На начальной стадии проектирования было рассмотрено несколько эскизов конструкций данного стенда, причем с учетом ранее указанных критериев. После чего, остановившись на одном из вариантов конструкции описываемой далее, приступили к непосредственному её изготовлению. Полученная конструкция, в результате рассмотрения нескольких эскизов установки претерпевала изменений в ходе её непосредственного изготовления, с учетом вышеописанных критериев. После чего, появилась реальная конструкция, удовлетворяющая требуемые показатели универсальности и точности позиционирования датчика. Сложнее всего было добиться требуемых показателей точности.

Внешний вид конструкции разработанной диагностической установки представлен на рисунке 1.

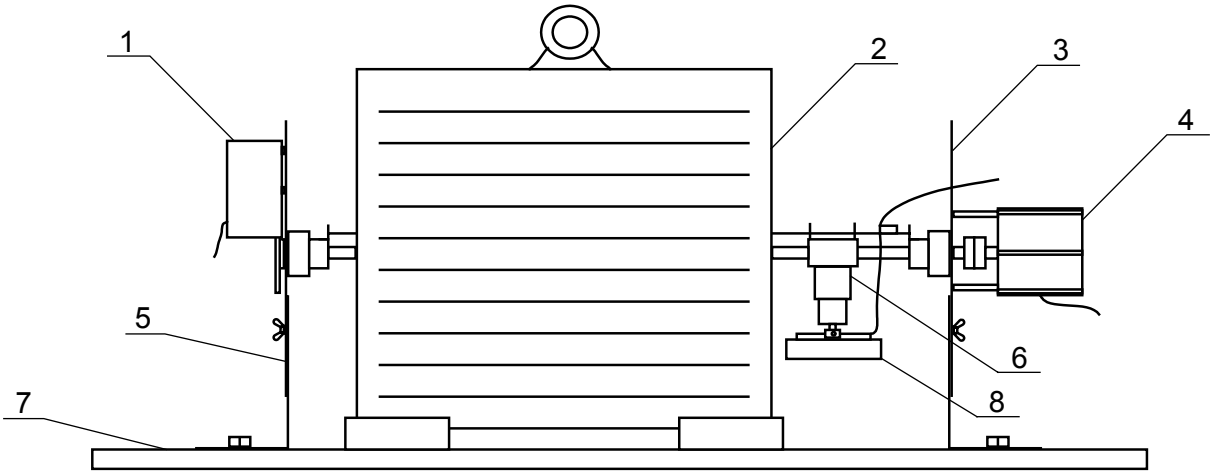


Рисунок 1 - Внешний вид стенда

Основные узлы установки согласно позициям на монтажной схеме (рисунок 1) :

1- ДУПК - двигатель углового перемещения каретки датчика.
2- Испытываемый статор.
3- Раздвижная стойка закрепленная неподвижно на станине стенда.
4- ДПП - двигатель продольного перемещения каретки датчика.

5- Раздвижная стойка съемная. Эта стойка отсоединяется во время установки испытуемого статора на стенд.

6- Телескопическое универсальное крепление датчика. Предназначено для крепления различных датчиков и настройки их на внутренний диаметр различных статоров.

7- Станина, на которой закреплены две раздвижные стойки и устанавливается испытываемый статор.

8- Индукционный датчик

Конструкция стенда состоит из двух одинаковых выдвигающихся стоек что предаёт стенду требуемую универсальность, так как это позволяет устанавливать на стенд статоры с различной высотой оси вращения. Стойки состоящие из двух одинаковых кронштейнов и двух одинаковых «опорных планках» закреплены на станине на расстоянии 349мм, что позволяет устанавливать на стенд статоры двигателей мощностью от 1 до 4,6 кВт. На стойках закреплены во втулках уравляющее «зубчатое колесо» с одной стороны и вращающаяся направляющая имеющая такие же размеры как и управляющее «зубчатое колесо» но не имеющая накатки зубьев. Зубчатое колесо и вращающаяся направляющая соединяются прутом направляющим. Винт ходовой установлен во втулках. На валу передвигается вдоль оси статора посредством механизма винт-гайка «корпус подвижный» в котором закреплена «втулка направляющая». Внутри «втулки направляющей» ходит «шток» с помощью которого и закреплён индуктивный датчик. На одной из стоек закреплен двигатель который путем вращения вала, осуществляет движение датчика вдоль оси статора (продольное перемещение).

Перемещение же датчика по окружности на заданный зубец осуществляется двигателем расположенным на противоположной стойке который приводит в движение ведущее «зубчатое колесо» имеющее 36 зубьев которая посредством зубчатой передачи приводит во вращение управляющее «зубчатое колесо» имеющее 72 зуба. А дискретное перемещение датчика на требуемый зубец осуществляется путём фиксирования управляющего зубчатого колеса, фиксаторм закрепленным на «планке опорной». Управляющее же зубчатое колесо сделано с универсальным количеством зубьев – 72, что позволяет отклонение датчика, на испытуемых статорах с различным количеством активных зубьев: 72,36,24. При этом управляющее зубчатое колесо будет перемещаться соответственно на 1, 2, 3 зуба, осуществляя, таким образом перемещение на все активные зубцы испытываемого статора (угловое перемещение) .

Были выбраны управляющие двигатели: двигатель продольного перемещения каретки ДППК марки РД-09 с редуктором и двигателя углового перемещения каретки ДУПК марки ДСОР32-15-2-УХЛ4 с редуктором.

Созданная система управления стендом состоит из нескольких блоков и элементов управления этими блоками.

Структурная схема системы управления стенда с предполагаемыми при модернизации установки элементами компьютеризации, представлена на рисунке 2.

СПП – система продольного перемещения, СУП – система углового перемещения, СУдуп – система управления двигателем углового перемещения, Судпп – система управления двигателем продольного перемещения, ДППК – двигатель продольного перемещения каретки, ДУПК – двигатель углового перемещения каретки, ИПД – блок управления питанием датчика, БУОД – блок управления оптическим датчиком, ОДУС – оптический датчик установки статора в исходное положение.

СПП - система продольного перемещения датчика предназначена для перемещения датчика вдоль испытываемого зубца и позиционирования в определенной точке. Система состоит из блока автоматических временных выдержек

(АВВ) построенного на основе двух микросхем КР512ПС10, с помощью которого осуществляется настройка на нужное количество тестовых точек для каждого зубца работающего после его включения постоянно в циклическом режиме; регулятора временных выдержек «перемещения» R24 с помощью которого можно выставить промежуток между точками тестирования, а соответственно и их количество; регулятора временных выдержек «Пауза» R19 с помощью которого можно выставить

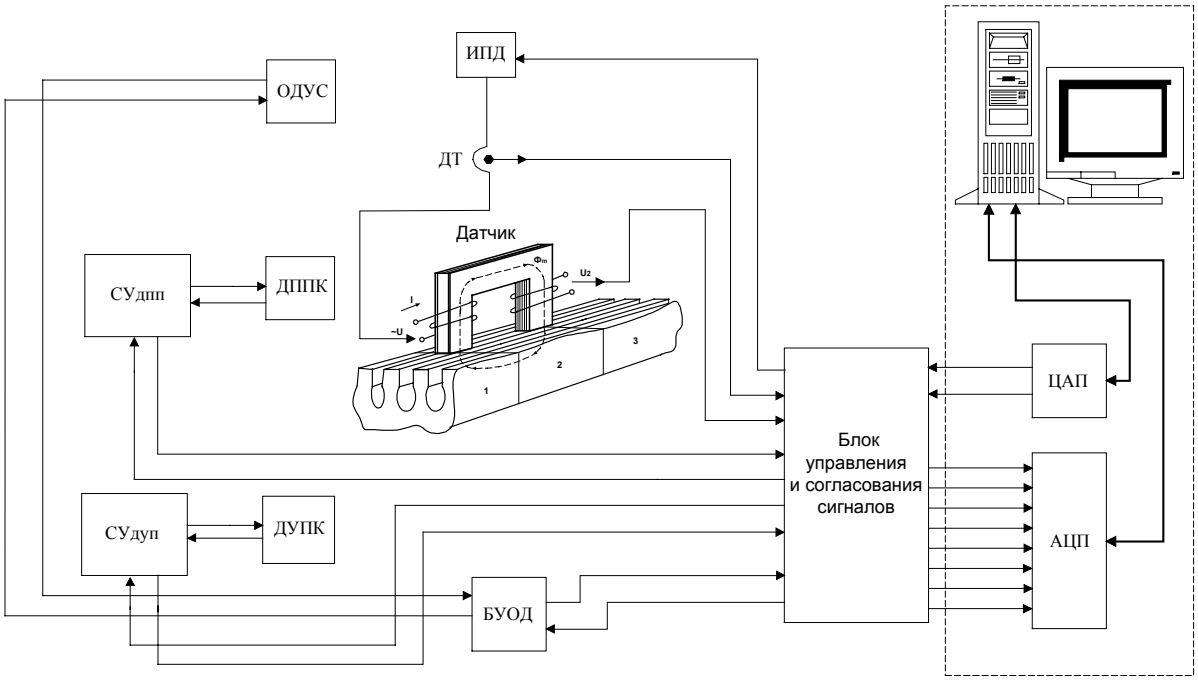


Рисунок 2 - Структурная схема системы управления стенда

продолжительность останова перемещения, а соответственно время для регистрации экспериментальных показаний с приборов А1 и U2; кнопки «Корректировка положения» обнуляющей блок АВВ и уменьшающей временные выдержки в пять раз, что позволяет откорректировать продольное положение индуктивного датчика на нужную точку начала эксперимента; тумблера имеющего три положения: «Вперёд» - перемещение датчика вдоль зубца вперёд, «Назад» - перемещения датчика вдоль зубца назад, и нейтрального - останов перемещения датчика. А так же двигателя продольного перемещения ДППК марки РД-09 с редуктором. Скорость продольного перемещения датчика относительно зубца постоянная и составляет 0,0048м/с.

СУП - система углового перемещения каретки предназначена для перемещения датчика в процессе тестирования на следующий испытываемый зубец дискретно, в зависимости от того, какое количество активных зубцов имеет статор. Система состоит из блока автоматических временных выдержек (АВВ) построенного на основе микросхемы КР1006ВИ1, с помощью которого осуществляется настройка на нужное количество тестовых точек для каждого зубца; регулятора временных выдержек «количество зубцов» R5 с помощью

которого настраивается блок АВВ; кнопки «Угловое перемещение» SB1, включающей блок АВВ; двигателя углового перемещения ДУПК марки ДСОР32-15-2-УХЛ4 с редуктором. Скорость перемещения шестерни ведомой двигателем постоянная и составляет 0,002м/с.

ИПД - блок управления питанием датчика, состоит из понижающего трансформатора и мощного проволочного резистора с помощью которого

устанавливается нужная величина переменного напряжения питания различных датчиков. Вольтметра переменного напряжения со шкалой до 20В, с помощью которого и отслеживается напряжение, подаваемое на датчик. Напряжение включается автоматически блоком СУпп во время останова ДППК, что осуществляется после запуска процесса тестирования в циклическом режиме, при нажатии кнопки «Тест».

Пульт управления (рисунок 3) – состоит из органов управления, которые находятся в блоках СУпп, СУупд, ИПД, БУОД.

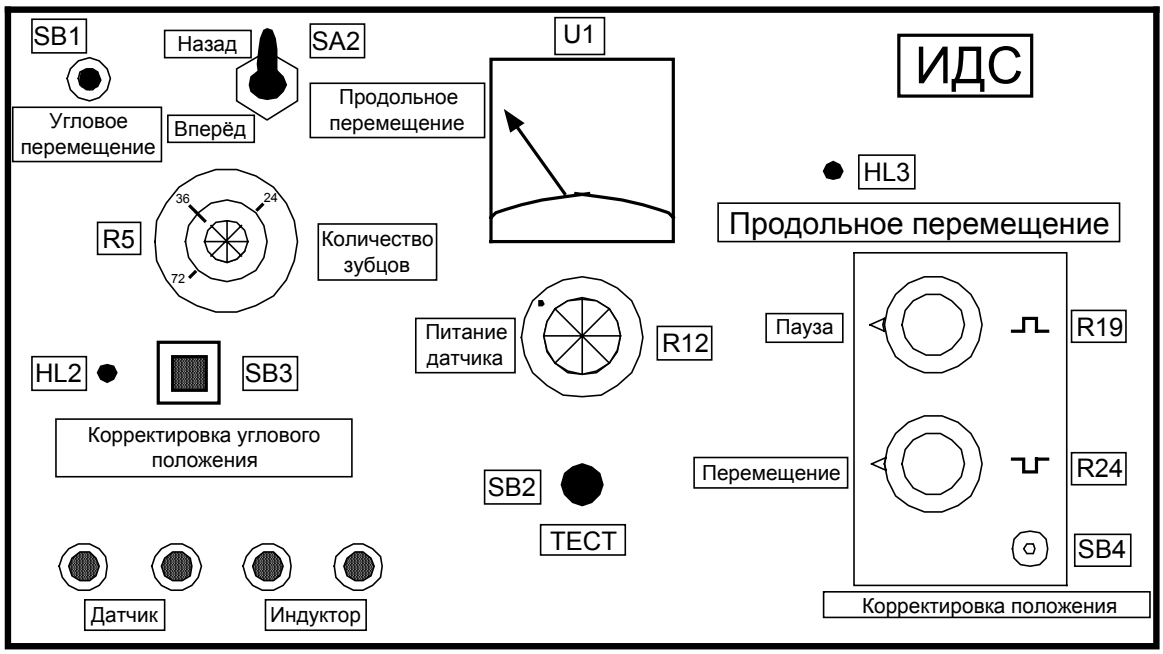


Рисунок 3 - Пульт управления измерительно-диагностической установки

При диагностике стали, предполагается создание базы данных, включающей в себя параметры АД. В ходе исследований производится сравнение действительных удельных потерь с каталожными, по результатам которого и можно судить о пригодности пакета. Кроме этого, просчитав магнитную цепь, можно определить место повреждения исследуемого пакета.

И, наконец, имея окончательную характеристику с учетом допустимых отклонений, можно будет сделать вывод о пригодности данного статора к дальнейшей работе.

Список литературы

1. Луговой А.В., Максимов М.Н., Родькин Д.И. и др. Эксплуатационная надежность электрических двигателей переменного тока и пути ее повышения. - Мат. сем. “Проблемы промышленного энергосбережения”, Кременчуг, КГПИ, 1998. - 15 с.
2. Прус В.В. Метод локального предремонтного тестирования электротехнической стали электродвигателей // Научн. тр. конф. “Проблемы создания новых машин и технологий”. - Кременчуг: КГПИ. - 1998. - Вып.2. - С. 120-124.
3. Прус В.В. Автоматическая система диагностики состояния электротехнической стали в процессе ремонта асинхронных двигателей // Труды науч.-техн. конф. “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – Харьков: Основа. – 1997. – С.355-356.

УДК 621.313.332

Д.А. Шокарев, В.И. Пасечник, Г.Ю. Рыков
Кременчугский государственный политехнический университет

Обоснование структуры систем формируемых источников аварийного электропитания

В статье поднимается актуальная на данное время проблема решения вопросов аварийного электропитания. Авторы предлагают схемотехнические решения систем аварийного электропитания, которые формируются из состава штатного энергосилового оборудования, имеющегося на предприятии.
аварийное электропитание, асинхронный генератор, ёмкостная составляющая, система регулирования

Решение вопросов аварийного энергопитания возможно при установке аварийных резервных электростанций – дорогого электромеханического оборудования, которое используется и находится в состоянии горячего резерва. В то же время практически любое предприятие в составе штатного оборудования содержит энергосиловое оборудование (бульдозеры, тепловозы, тягачи) с электромеханической трансмиссией, включающее двигатель внутреннего сгорания и электрический генератор; автомобили, тракторы с дизельными или карбюраторными двигателями. Предприятие имеет также электрические машины, которые могут исполнять роль генератора электрической энергии, преобразователи напряжения и частоты, используемые в технологических установках [4].

Таким образом, при наличии соответствующих технических решений, из имеющегося электромеханического оборудования могут формироваться источники аварийного энергопитания, как до аварии в системе электроснабжения, так и после. Технические решения по созданию формируемых источников аварийного электропитания (ФИАЭ) важны для гражданской обороны – защиты населения от стихийных бедствий [3].

Способ формирования источника аварийного питания с использованием энергосиловой установки транспортного средства, преимущественно автомобиля с механической трансмиссией, состоит в том, что транспортное средство фиксируют в неподвижном состоянии, соединяют выходной вал отбора мощности двигателя внутреннего сгорания с валом асинхронного генератора через блок согласования механизмов, закрепленный на общей основе с асинхронным генератором (АГ). Блок согласования механизмов представляет собой редуктор, согласующий выходную частоту вращения рабочего вала транспортного средства с номинальной частотой вращения вала АГ. Трехфазный выход АГ подключают к системе регулирования возбуждением генератора и к распределительным шинам [2]. Управление источником аварийного питания и реализации функций защиты и формирования заданного уровня частоты и амплитуды выходного напряжения происходит с помощью блока управления.

В большинстве существующих аварийных источников электропитания применяются синхронные генераторы (СГ). Целесообразность применения АГ обусловлена рядом преимуществ по сравнению с СГ:

- простота и надежность конструкции;
- пожаробезопасность (отсутствие скользящих контактов);
- небольшие токи короткого замыкания;

© Д.А. Шокарев, В.И. Пасечник, Г.Ю. Рыков. 2004

- при сбросе нагрузки АГ не происходит увеличения напряжения;
- стоимость АГ меньше стоимости СГ в диапазоне мощностей до 100 кВт [5].

Кроме того, в качестве АГ предлагается использовать обычный асинхронный двигатель, имеющийся в любом электрохозяйстве, а не специальную асинхронную машину.

Основным недостатком генераторной установки на базе АГ является сложность, связанная с регулированием емкостного тока возбуждения при изменяющейся нагрузке.

На рис. 1 представлена система с дискретным регулированием емкости конденсаторных батарей с аналоговой релейной контакторной системой управления.

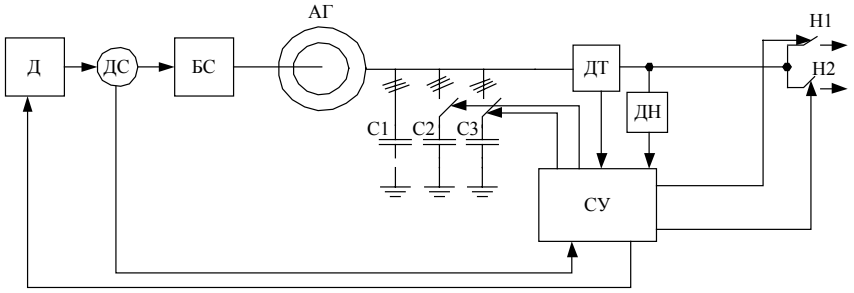


Рисунок 1- Блок-схема устройства ФИАЭ на базе АГ с релейной системой управления конденсаторным возбуждением АГ

В этой системе используются три конденсаторные батареи: С1 – батарея начального возбуждения, С2, С3 – рабочие батареи, компенсирующие максимальную реактивную нагрузку. Достоинством данной схемы является простота конструкции, недостатком – дискретное изменение напряжения на выходе генератора.

На рис. 2 изображена блок-схема устройства ФИАЭ с возбуждением АГ устройством плавного регулирования емкостной составляющей тока, построенного на базе полупроводникового регулятора напряжения РН.

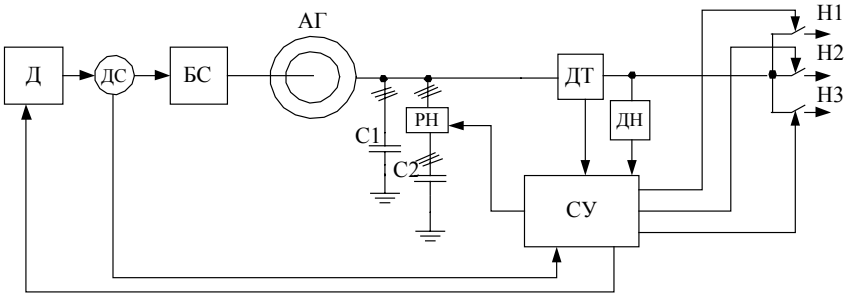


Рисунок 2 - Блок-схема устройства ФИАЭ с АГ в качестве генерирующей установки с устройством плавного регулирования емкостной составляющей тока на базе регулятора напряжения

Емкостная составляющая тока регулируется за счет изменения величины напряжения, подаваемого на рабочую емкость С2. Преимуществом данной схемы является отсутствие каких-либо индуктивных элементов и возможность подключения различной переменной нагрузки.

Система регулирования емкости конденсаторных батарей за счет поглощения избыточного емкостного тока индуктивностью L, которая управляется полупроводниковым регулятором напряжения РН, приведена на рис. 3.

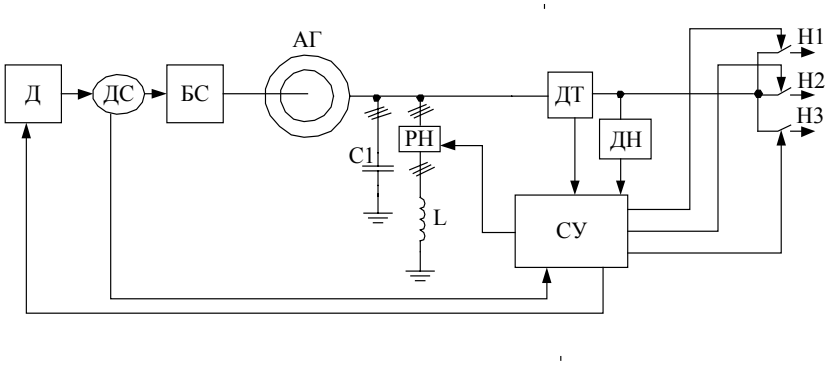


Рисунок 3 - Блок-схема устройства ФИАЭ с АГ в качестве генерирующей установки с устройством плавного регулирования индуктивности на базе регулятора напряжения

Данная схема лишена недостатка схемы на рис. 1, т. е. напряжение на выходе генератора можно поддерживать постоянным, при этом отклонения напряжения могут регулироваться в нужных пределах.

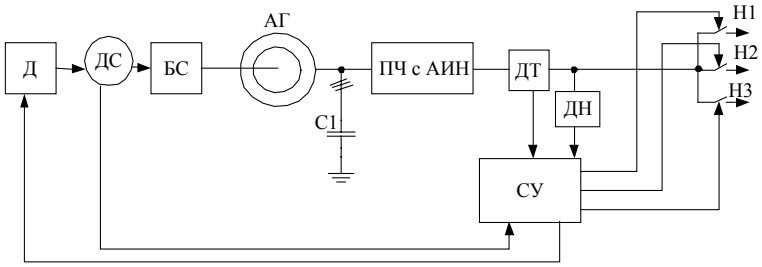


Рисунок 4 - Блок-схема устройства ФИАЭ с АГ в качестве генерирующей установки с инвертором на выходе

Схема, представленная на рис. 4, позволяет формировать напряжение заданной частоты и величины независимо от частоты вращения генератора и колебаний генерирующего напряжения.

Проблема создания формированных источников аварийного электропитания сводится к решению следующих вопросов:

- время ввода в работу ФИАЭ в случае аварийной ситуации;
- стоимость оборудования и услуг, связанных с эксплуатацией ФИАЭ.

Стоимость вводимого оборудования, входящего в состав ФИАЭ, напрямую зависит от типа электрической машины, которая будет использоваться в качестве генерирующей установки. Проведенный ранее анализ [5] показал целесообразность применения асинхронной машины в качестве генератора по сравнению с синхронной машиной на мощностях до 100 кВт. Ценовые и массогабаритные показатели выравниваются на мощностях свыше 100 кВт. Следует учесть стоимость дополнительного оборудования, связанного с возбуждением генератора и формированием выходного напряжения, соответствующего показаниям сети.

Дополнительным оборудованием для ФИАЭ на базе синхронного генератора и генератора постоянного тока являются:

- преобразователь напряжения постоянного тока для питания обмоток возбуждения генератора. На рис. 5 представлена зависимость стоимости транзисторных преобразователей постоянного тока для питания обмоток возбуждения генераторов от их рабочего тока (2) и цены для тиристорных регуляторов напряжения на соответствующие рабочие токи (1);

- преобразователи частоты для формирования необходимых характеристик выходного напряжения в соответствии с параметрами сети (величина и частота выходного напряжения). На рис. 6 (2) представлена стоимостная зависимость преобразователей частоты различной мощности.

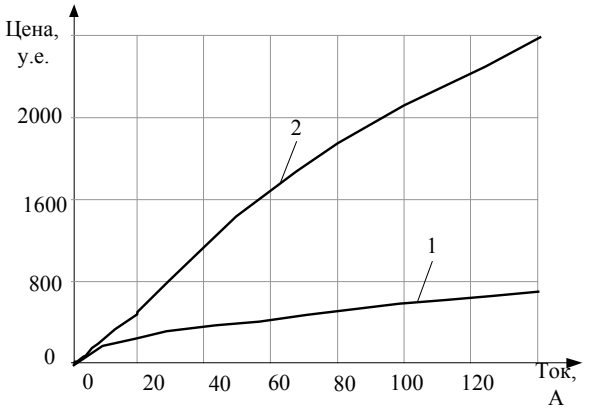


Рисунок 5 - Зависимость стоимости ТРН (1) и преобразователей постоянного тока (2) от их рабочего тока

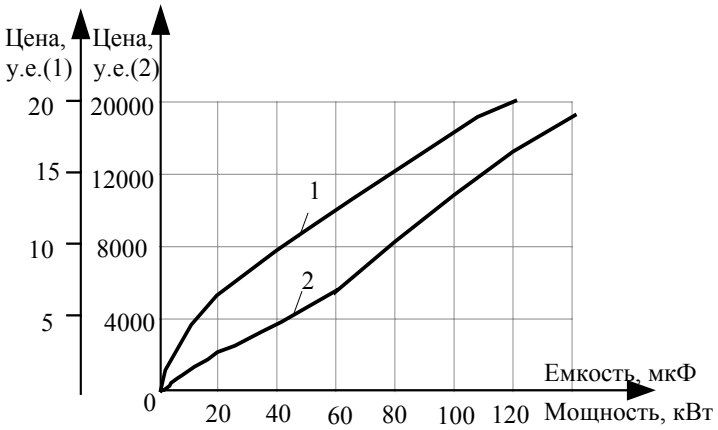


Рисунок 6 - Зависимость стоимости конденсаторов возбуждения от емкости (1) ПЧ от мощности (2)

Для ФИАЭ на базе асинхронного генератора в качестве стандартного дополнительного оборудования используют:

- конденсаторные емкости, необходимые для возбуждения АГ. В [1] был проведен анализ, позволяющий оценить требуемую величину емкости начального и рабочего возбуждения для асинхронных машин серии 4А на мощности до 100 кВт. На рис. 6 (1) показана стоимость емкостей для конденсаторного возбуждения АГ, соответствующего номинала;
- если ФИАЭ предусматривает плавное регулирование тока возбуждения АГ, то в состав стандартного оборудования может входить полупроводниковый регулятор напряжения, который позволяет регулировать ток конденсаторного возбуждения АГ. На рис. 5 показаны цены для тиристорных регуляторов напряжения на соответствующие рабочие токи (1).

С целью определения затрат на создание ФИАЭ на базе асинхронных и синхронных генераторов был проведен стоимостный анализ силового оборудования, входящего в состав ФИАЭ. Результаты представлены в табл.1 и табл.2.

Таблица 1 - Расчетная стоимость силового оборудования ФИАЭ на базе АГ

Тип АГ	$P_{ном}$, кВт	Стоимость АГ у.е.	Ёмкость нач. возб., мкФ	Стоимость ёмкости нач. возб., у.е.	Ёмкость раб. возб., мкФ	Стоимость ёмкости раб. возб., у.е.	Стоимость ТРН., у.е.	Общая стоимость силового оборуд. ФИАЭ, у.е.
4А80А4	1,1	40	10,621	22	17,36	27	250	339
4А112М4	5,5	85	30,797	51	71,14	48	369	553
4А132М4	11	120	56,954	63	136,54	108	510	800
4А180М4	30	380	102,448	79	388,10	288	860	1607
4А200L4	45	600	155,401	115	558,41	392	1250	2357
4А225М4	55	680	173,495	130	675,23	478	1610	2900
4А250М4	90	1000	232,388	188	1164,2	860	2500	4548

Таблица 2 Расчетная стоимость силового оборудования ФИАЭ на базе СГ

Тип СГ	Мощность ФИАЭ, кВт	Стоимость СГ, у. е.	Стоимость устройства возбуждения, у.е.	Стоимость ПЧ для формирования $U_{вых}$	Общая стоимость силового оборудования на базе СГ, у.е.
ЕСС-52-4	5	520	114	1163	1797
ЕСС-62-4	12	760	266	1755	2781
ЕСС-81-4	20	1000	456	2440	3896
ЕСС-82-4	30	1200	686	2836	4722
ЕСС-91-4	50	1320	1672	5083	8075
ЕСС-93-4	75	1420	1710	7591	10721

Естественно, что проведённый анализ нужно принимать, как приблизительный, так как оценка стоимости тех или иных функциональных блоков системы проводилась без учета затрат на разработку, внедрение и изготовление генерирующей установки. Важным элементом системы является блок согласования валов генератора и силовой установки транспортного средства, но в данной работе анализ стоимостных показателей по созданию блока согласования не представлен.

Проведенный анализ показывает, что генерирующие системы на базе АГ являются более предпочтительными, с точки зрения технических и экономических показателей, по сравнению с традиционными генерирующими установками на базе СГ на мощностях до 100 кВт.

Список литературы

1. Радин В.И., Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Электрические машины, М., Высшая школа, 1988, 329 с.
2. Шокарев Д.А., Рыков Г.Ю., Колесник Я.Н., регуляторы емкостного тока в схемах конденсаторного возбуждения асинхронных генераторов. «Проблемы создания новых машин и технологий», научные труды КГПУ, 2002, вып.1. с.215-218.
3. Огарь А.С., Панченко М.В., Рыков Г.Ю. Особенности создания формируемых источников питания с асинхронными генератором. «Проблемы создания новых машин и технологий», научные труды КГПУ. 2001, вып. 1. с.190-192.
4. Артамонов В.В., Маслов В.Е., Родькин Д.И., Солтус А.П. К вопросу создания формируемых источников аварийного электропитания. «Проблемы создания новых машин и технологий», научные труды КГПУ. 2001, вып.1.с.114-119.
5. Шокарев Д. А., Колесник Я. Н. Анализ систем возбуждения асинхронных генераторов «Проблемы создания новых машин и технологий», научные труды КГПУ. 2003, вып. 1. с.200-203.

УДК 621.313.332

Д.А. Шокарев, В.И. Пасечник, Г.Ю. Рыков
Кременчугский государственный политехнический университет

Математическое моделирование и экспериментальные исследования асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением

В статье рассматриваются вопросы математического моделирования асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением, и даётся сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на лабораторном стенде. Проведённые авторами исследования являются продолжением работ по созданию формируемых источников аварийного электропитания.
асинхронный генератор, самовозбуждение, переходные процессы

Асинхронные самовозбуждающиеся генераторы нашли достаточно широкое применение в существующих генерирующих установках. Чаще всего это специальные асинхронные машины, применяемые в ветроэнергетических и гидроэнергетических агрегатах. В формируемых источниках автономного электропитания авторы предлагают использовать в качестве генераторов обычные асинхронные электродвигатели, нашедшие наиболее широкое применение на предприятиях [1]. Развитие и перспективы применения асинхронных генераторов тесно связаны с всесторонним изучением различных режимов работы этих машин. Одной из важных задач является исследование переходных процессов, протекающих как при самовозбуждении генератора, так и работе под нагрузку.

Для анализа энергетических и экономических показателей было выполнено моделирование АГ и проведены экспериментальные исследования генерирующей установки на базе асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением со следующими параметрами: $P_{1ном} = 270$ Вт; $I_{1ном} = 0{,}857$ А; $U_{1ном} = 220$ В; $\cos\varphi = 0{,}65$; $\eta_{ном} = 0{,}68$; $s_{ном} = 0{,}063$; $\lambda_m = 2$; $\lambda_{min} = 1{,}5$; $\lambda_p = 1{,}8$; $K_i = 5$.

Одной из важных задач является исследование переходных процессов, протекающих как при самовозбуждении генератора, так и работе под нагрузку.

Моделирование процесса возбужденной работы АГ выполнено на основании модели, составленной в трехфазной системе координат. При составлении уравнений используются следующие допущения:

- фазные обмотки симметричны и сдвинуты в пространстве на 120^0;
- МДС обмоток и магнитные поля распределены синусоидально вдоль окружности воздушного зазора;
- ротор электрически и магнитно симметричен;
- реальные распределенные обмотки АГ заменяются сосредоточенными, МДС принята равной МДС реальной обмотки;
- учитываются потери в стали;
- не учитывается влияние рабочего магнитного потока на индуктивности рассеяния и влияние потоков рассеяния на рабочий магнитный поток АГ;
- индуктивности рассеяния обмоток асинхронного генератора приняты неизменными.

Для описания переходных процессов в АГ необходимо составить уравнения электрического равновесия для всех контуров, и уравнение движения ротора.

© Д.А. Шокарев, В.И. Пасечник, Г.Ю. Рыков. 2004

АГ представляют как систему магнитосвязанных обмоток, расположенных на статоре и роторе (рис. 1).

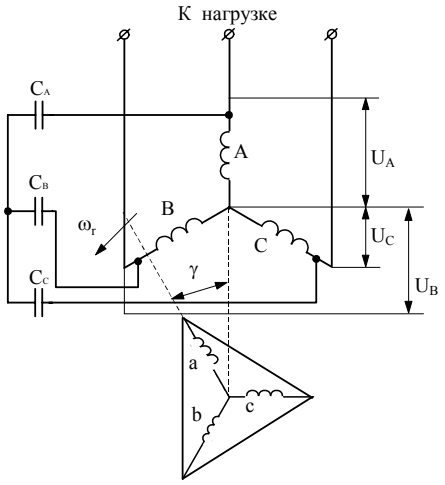


Рисунок 1- АГ – как система взаимосвязанных обмоток ротора и статора

Уравнения электрического равновесия контуров для статора и ротора асинхронного генератора:

$$\frac{d\psi_A}{dt} = U_{Ac} - i_A R_S \tag{1}$$

$$\frac{d\psi_B}{dt} = U_{Bc} - i_B R_S; \tag{2}$$

$$\frac{d\psi_C}{dt} = U_{Cc} - i_C R_S; \tag{3}$$

$$0 = i_a R_r + \frac{d\psi_a}{dt}; \tag{4}$$

$$0 = i_b R_r + \frac{d\psi_b}{dt}; \tag{5}$$

$$0 = i_c R_r + \frac{d\psi_c}{dt}; \tag{6}$$

где Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C — потокосцепления фаз статора;

Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c — потокосцепления фаз ротора;

R_S, R_r — активные сопротивления фаз статора и ротора.

Для осуществления режима самовозбуждения в асинхронном генераторе в статорную цепь включаются конденсаторы. Если система симметрична, то $X_{CA} = X_{CB} = X_{CC} = X_C$ и в уравнение модели асинхронной машины вместо напряжения источника питания следует подставить падение напряжения на конденсаторах для всех 3 фаз статора генератора.

$$\frac{dU_{Ac}}{dt} = -x_c I_A \tag{7}$$

$$\frac{dU_{Bc}}{dt} = -x_c I_B \tag{8}$$

$$\frac{dU_{Cc}}{dt} = -x_c I_C \tag{9}$$

где U_{Ac}, U_{Bc}, U_{Cc} - напряжение на емкости фаз А, В, С. x_c - индуктивное сопротивление подключаемой емкости при частоте 50 Гц.

Потокосцепление каждой фазы АГ определяется по известной методике [2].

Намагничивающий ток АГ определяется через свои составляющие по осям фаз A, B, C статора:

$$i_{\mu} = \sqrt{\frac{2}{3}\left(i_{\mu A}^2 + i_{\mu B}^2 + i_{\mu C}^2\right)};\ i_{\mu A} = i_A \quad \frac{1}{2}\left(i_B + i_C\right) + \frac{3}{2} \quad i_a; \qquad (10, 11)$$

$$i_{\mu B} = i_B - \frac{1}{2}\left(i_A + i_C\right) + \frac{3}{2}\cdot i_b;\ i_{\mu C} = -i_{\mu A} - i_{\mu B} \qquad (12, 13)$$

При работе генератора на активную симметричную трехфазную нагрузку уравнения 7 – 9 примут вид:

$$\frac{dU_{Ac}}{dt} = - x_c\left(I_A - I_{HA}\right) \qquad (14)$$

$$\frac{dU_{Bc}}{dt} = -x_c\left(I_B - I_{HB}\right) \qquad (15)$$

$$,\frac{dU_{Cc}}{dt} = -x_c\left(I_C - I_{HC}\right) \qquad (16)$$

где $I_{HA} = U_{Ac}/R_H$, $I_{HB} = U_{Bc}/R_H$, $I_{HC} = U_{Cc}/R_H$,

R_H – сопротивление нагрузки.

Приведенное математическое описание положено в основу модели асинхронного генератора. Основным недостатком полученной модели является её относительная громоздкость, большое количество нелинейных элементов, необходимость решать промежуточную систему линейных уравнений. Однако практика показала состоятельность и работоспособность полученной модели.

По составленным дифференциальным уравнениям была построена модель асинхронного генератора в математическом пакете MATLAB Simulink, результаты моделирования переходных процессов при самовозбуждении АГ представлены на рис.2 - 5.

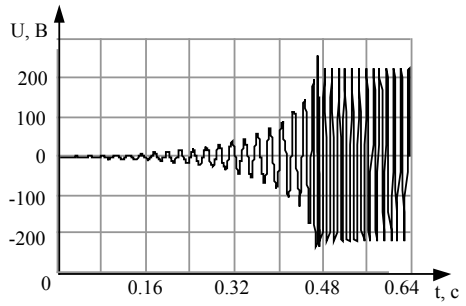


Рисунок 2 - Результаты моделирования переходного процесса самовозбуждения АГ (кривая напряжения)

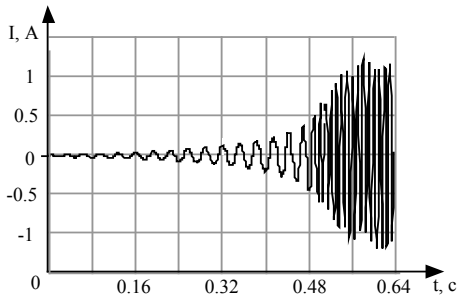


Рисунок 3 - Результаты моделирования переходного процесса самовозбуждения АГ (кривая тока)

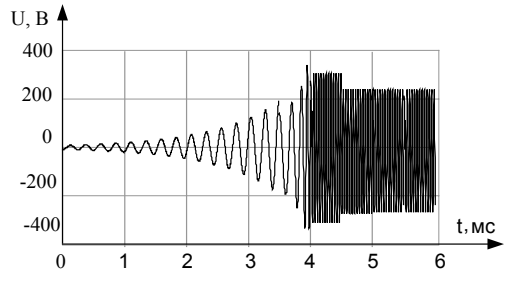


Рисунок 4 – Результаты моделирования переходного процесса напряжения самовозбуждения при набросе активно-индуктивной нагрузки

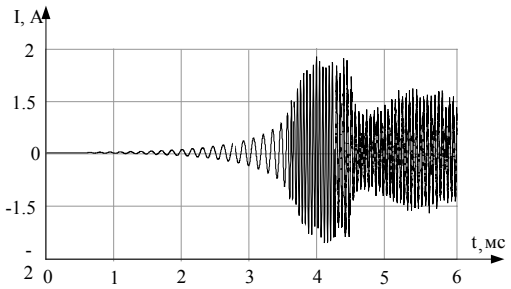


Рисунок 5 – Результаты моделирования переходного процесса тока самовозбуждения при набросе активно-индуктивной нагрузки

Объектом экспериментальных исследований является физическая модель асинхронной машины АОЛ-21 мощностью 0,37 кВт, которая реализована в виде экспериментального лабораторного стенда (функциональная схема стенда показана на рис.6).

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис.7 и рис.8, соответственно: переходной процесс напряжения и тока при самовозбуждении АГ.

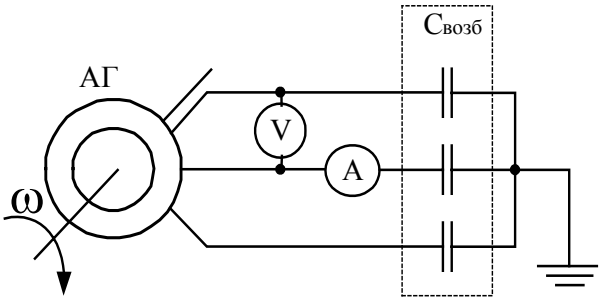


Рисунок 6 - Функциональная схема лабораторной экспериментальной установки

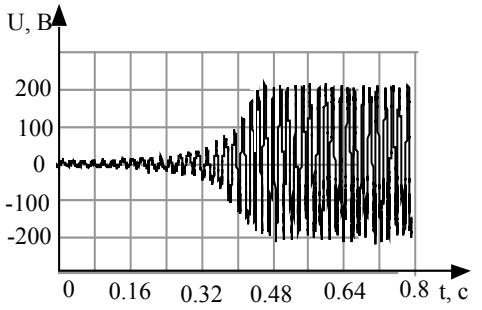


Рисунок 7 - Процесс самовозбуждения АГ (экспериментальная кривая напряжения)

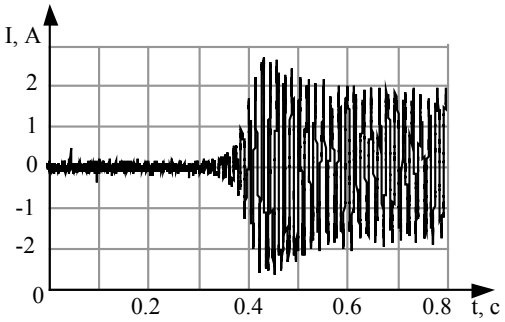


Рисунок 8 - Процесс самовозбуждения АГ (экспериментальная кривая тока)

Для анализа различных режимов работы асинхронного генератора были сняты экспериментальные характеристики работы АГ при различной нагрузке электрического характера: активной (рис.9, 10), активно-индуктивной (рис.11, 12), а также режимы подключения асинхронного двигателя в качестве нагрузки (рис13, 14).

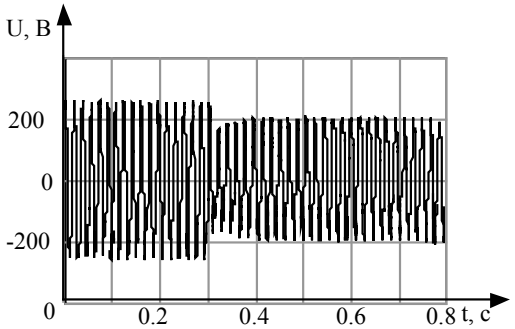


Рисунок 9 - Напряжения АГ при подключении активной нагрузки

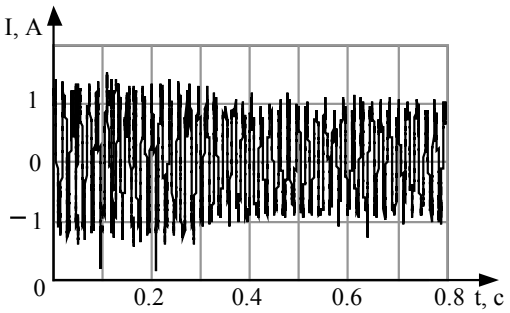


Рисунок 10 - Ток АГ при подключении активной нагрузки

Анализ токов при различных режимах работы автономной генераторной установки позволяет предложить рекомендации для выбора параметров силовых элементов регуляторов ёмкостного тока [3]. Анализ гармонического состава выходного

напряжения позволит выявить высшие гармоники и в дальнейшем разработать рекомендации касательно ограничения их амплитуды на допустимом уровне.

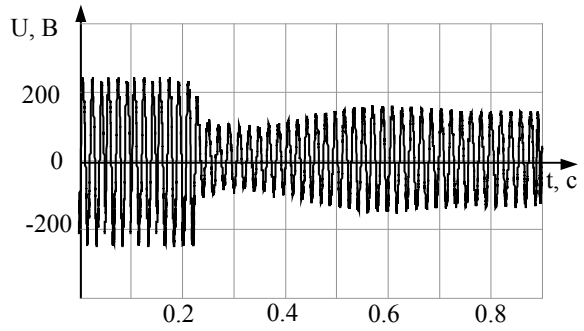


Рисунок 11 - Напряжения АГ при подключении RL-нагрузки

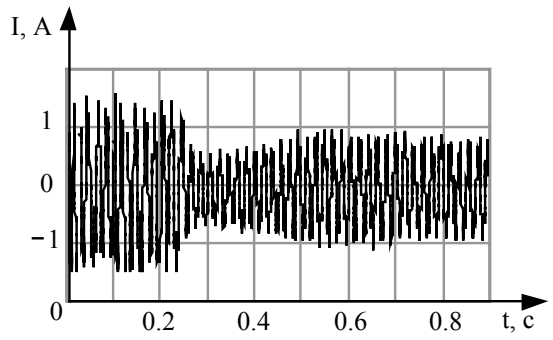


Рисунок 12 - Ток АГ при подключении RL-нагрузки

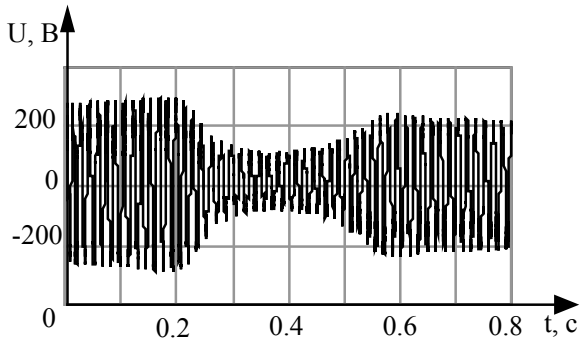


Рисунок 13 - Напряжения АГ при подключении двигательной нагрузки

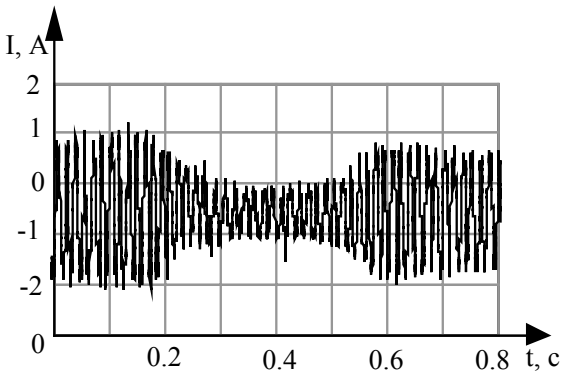


Рисунок 14 - Ток АГ при подключении двигательной нагрузки

Разработанная модель позволяет обеспечить эффективность исследования различных режимов работы системы, а именно, самовозбуждение и работу под нагрузкой.

Сравнительный анализ физической и математической модели показал высокую степень адекватности моделирования АГ.

Анализ влияния нагрузки на режим работы АГ позволяет рекомендовать, при построении системы автоматического управления регулятором емкостного тока, введение обратной связи по напряжению, что приведет к стабилизации колебаний выходного напряжения. Введение контура регулирования тока позволит ограничить его на допустимом уровне, что приведет к повышению надежности и качества преобразования энергии.

Список литературы

1. Огарь А.С., Панченко М.В., Рыков Г.Ю. Особенности создания формируемых источников питания с асинхронными генератором. «Проблемы создания новых машин и технологий», научные труды КГПУ. 2001, вып. 1. с.190-192.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических маши: Учеб. для вузов по спец. «Электические машины». – М: Высшая школа, 1987.
3. Шокарев Д.А., Рыков Г.Ю., Колесник Я.Н., регуляторы емкостного тока в схемах конденсаторного возбуждения асинхронных генераторов. «Проблемы создания новых машин и технологий», научные труды КГПУ, 2002, вып.1. с.215-218.

УДК 621.313.333

А.П. Калинов
Кременчугский государственный политехнический университет

Анализ методов идентификации электромагнитных параметров синхронных двигателей

В работе выполнены исследования по анализу методов идентификации электромагнитных параметров синхронных двигателей. Выдвинуты критерии пригодности методов идентификации для использования в практике послеремонтных испытаний. Определены основные достоинства и недостатки существующих методов, выполнена оценка методов согласно выдвинутым критериям.
синхронный двигатель, идентификация, электромагнитные параметры, метод определения параметров, частотные характеристики, полигармонический сигнал

Требования к надежности и экономической эффективности производства и эксплуатации электрических машин и электроэнергетических систем в целом непрерывно возрастают. Исследование электромеханических процессов, имеющих место в синхронных двигателях (СД), важно для нормальных и аварийных режимов. Одним из наиболее прогрессивных путей следует признать использование для исследований их математических моделей, адекватно отражающих реальные физические процессы. Моделирование электромеханических переходных процессов предполагает известность определенной совокупности активных и индуктивных сопротивлений, отражающих связь между токами и потокосцеплениями в магнитосвязанных контурах машины. Следовательно, использование электромагнитных параметров (ЭМП) синхронных машин, адекватно отображающих реальные физические процессы, позволит решать широкий спектр технических задач прогнозирования, контроля, управления процессами в электромеханических и энергетических системах, включающих синхронные машины.

На сегодняшний день существует множество работ, посвященных затронутой теме. В отечественной и зарубежной технической литературе освещены разнообразные методы определения параметров электрических машин (ЭМ) переменного тока, каждый из которых имеет свои достоинства, недостатки и сферу применения. В работах [1, 10] приведены основные методы, применяемые в промышленности и рекомендованные ГОСТом (без учета изменений в ГОСТ 10169-77 и стандартов МЭК), а в работе [2] была произведена классификация известных методов идентификации электромагнитных параметров.

Целью данной работы является попытка провести систематизацию методов и разработку соответствующих рекомендаций по их применению в контексте направления послеремонтной диагностики и паспортизации электрических машин.

Идентификация ЭМП СД в условиях электроремонтных цехов имеет ряд особенностей. Поэтому необходимо выдвинуть ряд критериев, по которым будет производиться оценка пригодности метода для использования в практике послеремонтной идентификации электромагнитных параметров.

Широкий спектр конструктивных исполнений, а также большой диапазон мощностей ремонтируемых СД остро ставит вопрос создания метода, работоспособного в указанных условиях и позволяющего создание для этих целей универсального и максимально автоматизированного оборудования. В этих условиях вопрос сложности подготовки к эксперименту, его проведения и обработки результатов играют первостепенную роль. При этом для возможности применения метода в послеремонтных испытаниях, очевидно, исключаются методы, включающие операции разборки ЭМ, установки датчиков в расточку статора, соединение валов испытуемой машины и приводного дви-

© А.П. Калинов. 2004

гателя (ПД). Критерий 1. Высокая степень автоматизируемости проведения эксперимента.

Другой особенностью послеремонтных испытаний является отличие ЭМП отремонтированного СД от среднесерийных для данного типа машин, а также отличие параметров по фазам ЭМ. Поэтому непригодными являются методы, определяющие параметры как интегральные для всего двигателя и не позволяющие судить и степени конструктивной несимметрии машины. Критерий 2. Дифференциальное определение параметров по фазам.

Важным фактором пригодности метода является определение всех ЭМП СД, а также отсутствие необходимости проведения дополнительных опытов для определения недостающих параметров. Дополнительные опыты допускается проводить на том же испытательном оборудовании без изменения его структуры. Критерий 3. Полнота определения параметров.

Характер входных данных метода (интегральные параметры режима испытаний, временные зависимости, частотные характеристики (ЧХ)), а также способ анализа (представление ЭМ в виде ЧХ, схем замещения, операторных уравнений, векторных диаграмм и т.д.) для определения параметров определяют сложность обработки опытных данных и точность получаемых результатов. При этом в качестве входных данных метода предпочтительнее использовать временные зависимости либо ЧХ, а для анализа - применять схемы замещения или операторные уравнения. Критерий 4. Простота обработки экспериментальных данных.

Следующим критерием пригодности применения метода для послеремонтной идентификации параметров следует выделить характер входного воздействия, т.к. этот аспект затрагивает важный вопрос применения специализированных силовых источников и коммутационных аппаратов, формирующих тестовые воздействия. Так, ряд воздействий (случайный процесс, белый шум, импульс) является не информативным [2], некоторые (ступенчатая функция) требуют силовых источников постоянного напряжения, а при использовании гармонических воздействий требуется силовой источник с регулируемой амплитудой, фазой или частотой синусоидального сигнала. При этом следует учитывать влияние режимов испытаний на питающую сеть ремонтного предприятия. Критерий 5. Простота источника тестовых сигналов.

Отдельным пунктом можно выделить возможность повреждения испытуемого СД в процессе проведения опыта. Критерий 6. Отсутствие повреждений в процессе проведения эксперимента.

К дополнительным требованиям, предъявляемым к методам определения, можно отнести степень детализации математического представления электрической машины (использование Г-образных, Т-образных, уточненных (учитует не равенство сопротивлений взаимоиндукции между различными контурами) схем замещения, учет потерь в стали), и определение нелинейностей машины (насыщение участков магнитных цепей по пути основного потока и потоков рассеяния, влияние вытеснения тока на активные и индуктивные сопротивления). Этот критерий позволяет корректно определить распределение потерь в СД и с высокой точностью исследовать энергопроцессы в ЭМ.

Критерий 7. Высокая степень детализации математического представления СД.

В конечном итоге соответствия факторов методов идентификации выдвинутым критериям составляют технологичность испытаний и определяют технико-экономическую обоснованность применения метода в указанных условиях.

Анализ литературных источников и патентной документации позволил выявить основные недостатки существующих способов идентификации параметров СД.

Сначала рассмотрим ряд стандартных методов определения некоторых параметров в статическом режиме при вращающемся роторе без изменения электромагнитного состояния электрической машины. Характерной особенностью этих методов является наличие приводного двигателя (обычно синхронного), измерения действующих значений режимных величин с получением интегральных значений искомых параметров.

Метод 1. Метод малого скольжения [1, 8-10, 14]. Служит для определения x_q. Режим работы СД – генераторный. Недостатки метода:
- требуется проведения опытов холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) [6];
- ПД достаточной мощности для поддержания постоянного скольжения s<1%.

Метод 2. Метод поворота фазы питания [1, 9, 10, 14]. Служит для определения x_d и x_q. Режим работы СД – генераторный. Метод дает наиболее точные значения искомых параметров. Недостатки метода:
- требуется приводной синхронный двигатель;
- необходим источник трехфазного тока с поворачиваемой фазой (агрегат с машиной продольно-поперечного возбуждения или фазорегулятор достаточной мощности).

Метод 3. Метод отрицательного возбуждения [1, 9, 10, 14]. Служит для определения x_q. Режим работы СД – двигательный. Недостатки метода:
- требуется проведения опытов холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) [6];
- применим только для достаточно крупных машин ($\Delta P_{мех}$<1%);
- в ходе испытаний для неявнополюсных ЭМ могут получаться ожоги в местах контактов бочки индуктора с бандажными кольцами на лобовых частях обмотки [1].

Метод 4. Метод Беккю (метод измерения фиктивной мощности при двухфазном КЗ) [1, 9]. Служит для определения сопротивлений обратной последовательности x_2 и r_2. Режим работы СД – генераторный. Недостатки метода:
- требуется приводной синхронный двигатель;
- необходим источник регулируемого по амплитуде синусоидального напряжения;
- существует опасность перегрева демпферных обмоток.

Метод 5. Метод обратносинхронного вращения [1, 9]. Служит для определения x_2 и r_2. Режим работы СД – генераторный. Недостатки метода:
- требуется приводной синхронный двигатель;
- большие погрешности метода.

Методы 6-7. Методы определений сопротивлений нулевой последовательности x_0 и r_0 [1, 9]: метод постороннего однофазного питания (метод Моргана и Райта), метод короткого замыкания двух фаз на нейтраль (метод Райта). Режим работы СД – генераторный. Недостатки метода:
- требуется приводной синхронный двигатель;
- необходимость в процессе опыта при неподвижном машине медленного проворачивания ротора.

Методы 8-9. Методы определения x_d и x_q [13, 25] с использованием векторных диаграмм. Режим работы СД – генераторный. Применяется для определения параметров СД с постоянными магнитами. Недостатки методов:
- требуется ПД (СД [13], либо двигатель постоянного тока [25]);
- определение угла выбега ротора [13], либо скорости вращения [25] СД.

Метод 10. Метод определения x_d и x_q [7] в эксплуатационных условиях. Режим работы СД – двигательный. Метод не требует ПД. Недостатки метода:
- необходимо определение угла выбега ротора испытуемого двигателя;
- приближенное определение параметров.

Долее рассмотрим методы, основанные на исследовании изменения электромагнитного состояния электрической машины. Данные методы позволяют определить больший перечень электромагнитных параметров. Методы подразумевают фиксацию мгновенных значений измеряемых параметров (токи и напряжения статора). Частота вращения ротора в общем случае не нулевая, и, обычно, изменяется в процессе проведения опыта.

Метод 11. Определение параметров из опыта симметричного внезапного короткого замыкания (ВКЗ) [1-3, 5, 7, 9, 10, 12, 14-16, 18, 22-24, 26]. Исходное состояние СД – двигательный режим, холостой ход. Метод более пригоден для испытаний в условиях завода-изготовителя [1]. Здесь следует разделять:

Метод 11.1. Определения ЭМП по результатам обработки осциллограмм токов статора в режиме ВКЗ (метод преобразования координат) [1-3, 5, 7, 9, 10, 12, 14, 15, 22-

24]. Метод базируется на анализе огибающей периодической составляющей тока статора и выделении графоаналитическим методом постоянных времени. С помощью указанного метода определяются следующие параметры: синхронные x_d и T_d, переходные x'_d и T'_d, сверхпереходные x''_d и T''_d индуктивные сопротивления и постоянные времени соответственно.

Метод 11.2. Определения параметров по результатам обработки ЧХ (зависимостей проводимостей от скольжения) [3, 16, 18, 26]. Причем в работах [3, 16, 26] описаны методики получения ЧХ из опыта ВКЗ, а в работе [18] разработан метод синтеза Г-образных схем замещения СД с n-демпферными контурами на роторе и определение всех ее параметров на основании ЧХ. При этом ЧХ для анализа могут быть получены как из опыта ВКЗ, так и из опытов затухания постоянного тока при неподвижном роторе, опыта замера проводимостей со стороны ротора при различном скольжении ротора, а также из опыта включения неподвижной (пуск) и вращающейся (самозапуск) машины в сеть.

Недостатки методов:

- проведение эксперимента в режиме, близком к аварийному, что может привести к появлению не замеченных сразу дефектов [1, 2, 26];
- метод 11.1 требует проведения опыта ХХ;
- затруднения проведения опыта для ЭМ низкого напряжения [1];
- субъективность графоаналитических построений (хотя, в работе [24] описано компьютеризированное устройство фирмы Siemens, позволяющее автоматически обрабатывать данные опыта ВКЗ, но, с другой стороны в [27] утверждается, что анализ, базирующийся на графическом подходе, реализованный даже на ЭВМ, не всегда дает удовлетворительные результаты);
- метод 11.2 требует в качестве входных данных параметры $x_{\sigma 1}$, r_1, x_{ad};
- при анализе частотных характеристик (метод 11.2) затруднено разделение параметров по продольной и поперечной осям.

Метод 12. Определение параметров из опыта восстановления напряжения при отключении КЗ [1-3, 10]. Служит для определения параметров x'_d и x''_d. Режим работы СД – генераторный. Основным недостатком метода является необходимость ПД.

Метод 13. Определение параметров из опыта отключения невозбужденной машины от источника питания [1-3, 7, 9, 10]. Служит для определения параметров x''_q и x''_d. Начальный режим работы СД – двигательный. Основным недостатком метода является определение только сверхпереходных сопротивлений.

Среди основных недостатков вышеперечисленных методов, основанных на исследовании изменения электромагнитного состояния СД, следует выделить трудоемкость проведения испытания и обработки измеренных данных, невозможность определения параметров отдельно по фазам, определение части перечня параметров, необходимость фиксации мгновенных значений измеряемых параметров на значительном промежутке времени.

Рассмотрим методы определения электромагнитных параметров при неподвижном роторе машины.

Метод 14. Определение параметров x''_q и x''_d методом многократного поворота ротора [1, 9]. Основным недостатком метода следует считать собственно необходимость в многократном проворачивании ротора с малым шагом. Этого недостатка лишена модификация метода, предложенная Мамиконянцем.

Метод 15. Определение индуктивного сопротивления рассеяния статора при удаленном индукторе [1, 10]. Недостатки метода:

- необходимость в разборке СД;
- установка контрольной катушки на активную поверхность якоря.

Метод 16-17. Определение постоянных времени T'_{d0}, T'_d, T''_d, T''_{d0} из опытов гашения поля и ударного возбуждения [1, 2, 10]. К недостаткам методов следует отнести необходимость в возбудителе и автомате гашения поля.

Метод 18. Определение параметров (индуктивных сопротивлений и постоянных времени обмоток СД) по частотным характеристикам (зависимостям проводимостей от частоты питающего напряжения) [2, 4, 7, 8, 14, 15]. Метод применяется для определения $x_{d(q)}$, $T_{d(q)}$, $x'_{d(q)}$, $T'_{d(q)}$, $x''_{d(q)}$, $T''_{d(q)}$. Для определения частотных характеристик проводят опыт питания обмоток якоря неподвижной машины синусоидальным напряжением переменной частоты. Недостатки метода:

- необходимость формирования испытательного напряжения синусоидальной формы регулируемой частоты;
- необходимость предварительной точной установки ротора в положения, соответствующие совпадению и взаимоперпендикулярному положению продольной оси ротора и м.д.с. системы обмоток статора.

Метод 19. Определение параметров из опыта затухания постоянного тока в обмотке статора [2, 7, 16]. Метод основан на анализе частотных характеристик, полученных из осциллограмм затухания токов. При этом определяются синхронные, переходные и сверхпереходные индуктивные сопротивления по осям d и q.

Метод 20. Определение электромагнитных параметров из опыта компенсации магнитного потока в зазоре [2, 17]. Изменяя амплитуду переменного напряжения номинальной частоты, которым осуществляют влияние на обмотку возбуждения, и, регулируя сдвиг фаз токов в обмотках статора и ротора добиваются компенсации магнитного потока в воздушном зазоре. Недостатки метода:

- установка датчика магнитного потока в воздушный зазор ЭМ;
- применение сложного трансформаторного оборудования;
- необходимость в проведении дополнительных опытов ХХ и КЗ.

Основным недостатком, присущим большинству способов определения параметров СД при неподвижном роторе, является необходимость предварительной точной установки ротора в положения, соответствующие совпадению и взаимоперпендикулярному положению продольной оси ротора и м.д.с. системы обмоток статора. Эта операция производится вручную, или с помощью каких-либо технических средств (домкраты, краны и т.д.), и, для машин большой мощности, представляет собой значительную трудность.

Отдельно следует выделить методы определения параметров, базирующиеся на данных заводов изготовителей.

Метод 21. Расчет параметров по каталожным данным [10, 28].

Метод 22. Метод определения параметров на основе полевых расчетов с помощью двухмерного метода конечных элементов [22, 23]. Дает точные результаты, однако требуют знания геометрических размеров ЭМ и характеристик конструктивных элементов, что не приемлемо в практике послеремонтной идентификации СД, т.к. характеристики активных элементов двигателя изменяются после ремонта.

В последнее время разработан ряд методов определения параметров схем замещения СД в схемах полигармонического питания [19-21, 29].

Метод 23. Определение параметров по уточненной схеме замещения, в которой потери в стали эквивалентизированы активным сопротивлением в контуре взаимоиндукции, зависящим от частоты гармоники тока в степени α [19, 29]. Суть способа заключается в предварительном определении положения ротора. Далее на одну из обмоток статора подается полигармоническое испытательное напряжение, и фиксируются кривые мгновенных значений тока и напряжения статора. Полученные кривые подвергаются разложению в гармонический ряд, определяются полные комплексные сопротивления синхронный машины по оси d и q для различных гармоник. С помощью полученных данных определяются параметры схем замещения. Метод в качестве исходных данных требует значения активных сопротивлений статора (отдельно по каждой фазе) и ротора, также для закрепления устойчивости решения уравнений желательно использование значений некоторых параметров и их совокупностей [19, 20], полученных в дополнительных опытах на том же оборудовании.

Метод 24. Метод определение параметров по непрерывной функции тока статора с использованием операторных уравнений [21]. По измеренным дискретным значениям тока якоря, с использованием «особых» точек (моменты включения, отключения тиристоров, равенства производных токов нулю), численным решением уравнений определяются коэффициенты операторного уравнения.

Достоинством разработанных методик для схем полигармонического питания является простота формирования тестовых сигналов – обмотки двигателя запитываются от сети через тиристорный регулятор напряжения. Разработанная методика определения положения ротора [19, 29] позволяет разделять параметры СД по осям d и q при произвольном положении ротора относительно обмоток статора. Определения электромагнитных параметров производится путем анализа мгновенных значений токов и напряжений, которые с помощью АЦП представляются в цифровом виде.

Таблица 1 - Таблица соответствия рассмотренных методов выдвинутым критериям

№ метода	Наименование метода	Наименование критерия						
		автоматизируемость	дифференц. опред. параметров	полнота определения параметров	простота обработки	простота источника	отсутствие повреждений	детализация мат. описания
1	Метод малого скольжения	-	-	-	+	+	+	-
2	Метод поворота фазы питания	-	-	-	+	-	+	-
3	Метод отрицательного возбуждения	+	-	-	+	+	-	-
4	Метод Беккю	-	-	-	+	-	-	-
5	Метод обратносинхронного вращения	-	-	-	+	+	+	-
6-7	Методы определений сопротивлений нулевой последовательности x_0 и r_0	-	-	-	+	+	+	-
8-9	Методы определения синхронных индуктивных сопротивлений x_d и x_q с использованием векторных диаграмм	-	-	-	+	+	+	-
10	Метод определения синхронных индуктивных сопротивлений x_d и x_q в эксплуатационных условиях.	-	-	-	-	+	+	-
11.1	Определения параметров по результатам обработки осциллограмм токов статора в режиме ВКЗ (метод преобразования координат)	+	-	-	-	+	-	-
11.2	Определения параметров по результатам обработки частотных характеристик (зависимостей проводимостей от скольжения)	+	-	-	+	+	-	+
12	Определение параметров из опыта восстановления напряжения при отключении КЗ	-	-	-	+	+	+	-
13	Определение параметров из опыта отключения невозбужденной машины от источника питания	+	-	-	+	+	+	-
14	Определение параметров методом многократного поворота ротора	-	-	-	+	+	+	-
15	Определение индуктивного сопротивления рассеяния статора при удаленном индукторе	-	+	-	+	+	-	-
16-17	Определение постоянных времени из опытов гашения поля и ударного возбуждения	+	-	-	+	-	+	-
18	Определение параметров по частотным характеристикам (зависимостям проводимостей от частоты питающего напряжения)	-	-	-	-	-	+	-
19	Определение параметров из опыта затухания постоянного тока в обмотке статора	-	+	-	+	+	+	-
20	Определение электромагнитных параметров из опыта компенсации магнитного потока в зазоре	-	+	+	+	-	-	-
21	Расчет параметров по каталожным данным	+	-	+	+	+	+	-
22	Метод определения параметров на основе полевых расчетов	+	+	+	-	+	+	+
23	Определение параметров в схемах полигармонического питания	+	+	+	+	+	+	+
24	Метод определение параметров по непрерывной функции тока статора с использованием операторных уравнений	+	+	+	+	+	+	-

При классификации описанных методов целесообразно будет разделить процесс идентификации электромагнитных параметров СД на экспериментальную (проведение опыта) и расчетную (обработка данных) части, т.к. данные различных опытов можно использовать для обработки с помощью одного математического аппарата и наоборот. Классификацию методов с точки зрения организации и проведения опыта можно провести по следующим признакам (в фигурных скобках указаны номера рассмотренных методов):

- состояние ротора (s=0 {3-5, 7-8, 10}, s≠0 {1, 2, 9, 11, 12}, s=1 – ротор в положении совпадения осей фаз статора и ротора {16-20}, s=1 – ротор в произвольном положении {6, 14, 23, 24});

- режим работы СД (статический {1, 2, 4-10, 14, 15, 18-20, 23, 24}, динамический {3, 11-13, 16, 17} – внезапное изменение электромагнитного состояния);

- входное воздействие (1(t) – ступенчатое воздействие {3, 17, 19}, $X\cdot\sin(\omega t)$ {14, 15} или $X\cdot\sin(st)$ {1, 2, 4-9, 12}– синусоидальный сигнал, $X_i\cdot\sin(\omega t)$ {4}– синусоидальный сигнал с изменяемой амплитудой, $X\cdot\sin(\omega_i t)$ {18} или $X\cdot\sin(s_i t)$ {11.2}– синусоидальный сигнал с изменяемой частотой, $X\cdot\sin(\omega t+\varphi_i)$ – синусоидальный сигнал с изменяемой фазой {2, 20}, $\Sigma X_\nu\cdot\sin(\nu\omega t+\varphi_\nu)$ {23, 24}– полигармонический сигнал, x(t) – временной сигнал произвольной формы {24}, коммутация сети и выводов двигателя {11-13, 16, 19});

- место приложения воздействия (статор - 3-и фазы {11, 13, 20}, статор 2-е фазы {4, 14, 18, 19, 23, 24}, статор – 1-на фаза {6, 14, 15, 19, 23 ,24}, ротор {3, 16, 17, 23 ,24}, вал {1, 5, 7-9, 12}, статор + ротор, вал + статор {2, 4,});

- фиксация тестовых и выходных сигналов ($x_э$ – эквивалентные значения {1-10, 14, 15, 18, 20}, x(t) - мгновенные значения {11-13, 16, 17, 19, 23, 24});

- дополнительные операции или данные (проведение опытов ХХ и КЗ {1, 3, 20}, замер r_1 и r_f {20, 23, 24}, определение $x_{\sigma 1}$ и $x_{ad(q)}$ {11.2}, разборка машины {15}, установка датчиков в зазор или на вал двигателя {8-10, 15, 20}, соединение с валом приводного двигателя {1, 2, 4-9, 12}, проворачивание вала {6, 14, 18-20}, использование каталожных данных или конструктивных параметров {21, 22}).

Классифицировать методы с точки зрения обработки экспериментальных данных возможно по следующим признакам:

- математическое представление электрической машины (схемы замещения {11.1, 23}, частотные характеристики – зависимости проводимостей от частоты питающего напряжения или от скольжения ротора {11, 18, 19}, операторные уравнения {20, 24}, векторные диаграммы {7-10}, физические либо эмпирические зависимости {1-7, 12-17, 21, 22});

- получаемые данные (x_q {1, 3}; $x_{\sigma 1}$ {15}; x_q, x_d {2, 8-10}; x_2, r_2 {4, 5}; x_0, r_0 {6, 7}; x_d, T_d, x'_d, T'_d, x''_d, T''_d {11.1}; $x_{d(q)}$, $T_{d(q)}$, $x'_{d(q)}$, $T'_{d(q)}$, $x''_{d(q)}$, $T''_{d(q)}$ {18}; $x_{d(q)}$, $x'_{d(q)}$, $x''_{d(q)}$ {19}; x'_d и x''_d {12}; x''_q, x''_d {13, 14}; T'_{d0}, T'_d, T''_d, T''_{d0} {16, 17}; $x^{(n)}_{\sigma kd(q)}$, $r^{(n)}_{kd(q)}$ {11.2}; $x_{\sigma 1}$, $x_{\sigma f}$, $x_{ad(q)}$, $x_{\sigma kd(q)}$, $r_{kd(q)}$ {23, 24}; все параметры схемы замещения {20-22});

- ограничения математического аппарата (определяются параметры схемы замещения фиксированной {20-24} либо произвольной (многоконтурный ротор) {11-14, 16,17-19 } структуры);

- возможность определения несимметрии сопротивлений фаз статора (да {15, 18-20, 22-24}, нет {1-14. 16, 17, 21}).

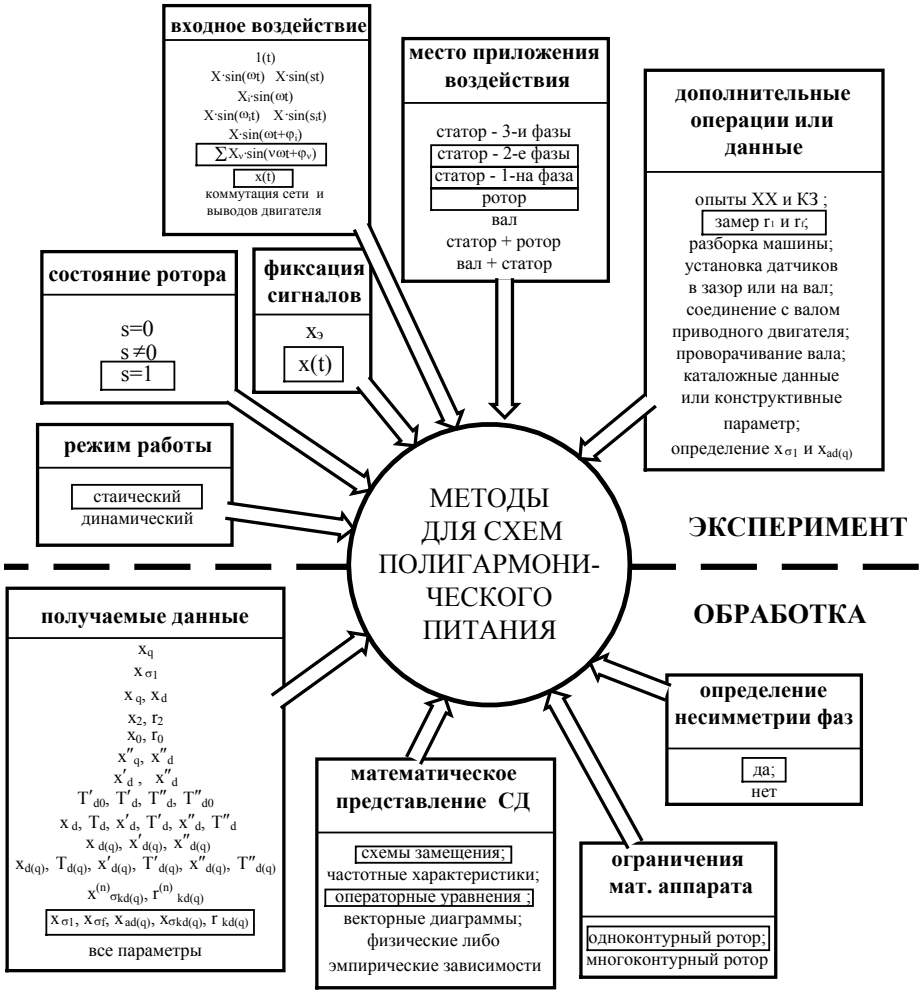


Рисунок 1 – Место методов для схем полигармонического питания в классификации методов идентификации электромагнитных параметров СД

Одним из результатов проведенного анализа методов определения параметров синхронных машин является отсутствие метода, который удовлетворял бы требованиям, как испытательного процесса, так и практических задач современного электропривода. Большинство известных методов испытаний являются не технологичными. Практически все методы позволяют определить только часть ЭМП СД, и лишь в виде интегральных величин без возможности определения параметров отдельно по фазам. При этом следует выделить тот факт, что зачастую определяются не сами параметры схемы замещения, а производные от них величины (синхронные, переходные, сверхпереходные параметры).

Приведенные достоинства методик с использованием схем полигармонического питания делают процедуры проведения опыта и обработки экспериментальных данных легко автоматизируемыми. Разработанное испытательное оборудование [29] позволяет проводить дополнительные опыты, не производя каких-либо переключений и изменений структуры оборудования. Следует указать, что использование вентильных схем и полигармонических тестовых сигналов открывает большие возможности в создании легко автоматизируемых и воспроизводимых методов идентификации электромагнитных параметров и диагностики состояния ЭМ. В качестве дальнейшего развития методов можно выделить определение параметров многоконтурного ротора.

Список литературы

1. Жерве Г.К. «Промышленные испытания электрических машин».-Л.: Энергоатомиздат, 1984.-408с.
2. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.
3. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980. 344с.
4. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность ЭМ, М.: Высшая школа, 1988, с. 231.
5. Лютер Р.А. Расчет синхронных машин, Л.: Энергия, 1979.- с.272.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1985.-840с.
7. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков К.А. Электрические машины (специальный курс). Учебн. для вузов по спец. «Электрические машины», 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1987.- 287с.
8. Дунаевский С.Я., Крылов О.А., Мазия Л.В. Моделирование элементов электромеханических систем. Г.-Л.: изд-во Энергия, 1966.-304с.
9. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. Учебник для вузов, изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – 319 с.
10. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика СД. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
11. Пинский Г.Б., Домбровский В.В. Расчет явнополюсных синхронных машин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 136с.
12. Конкордиа Ч. Синхронные машины. Переходные и установившиеся процессы.перевод с англ. Государственное энергетическое издание. Москва-Ленинград. 1956 г. 268с.
13. Астахов Н.В., Лопухина Е.М., Медведев В.Т. Испытания электрических микромашин: Учеб. Пособие для электротехн. втузов. Под ред. Астахова Н.В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. 272с.
14. ГОСТ 10169-77. Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 73 с.
15. International Electrotechnical Commission (IEC) Standard. Rotating Electrical Machines. Part 4: Methods for determining synchronous machines quantities from tests. Publication 34-4. Geneva, 1985.- 175 p.
16. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 624 с.
17. Способ определения индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток трехфазной синхронной машины: А.с. 1343364 СССР, МКИ G 01 R31/34. / Рогозин Г.Г., Печуркин Ю.И., Ларин А.М. – 5 с.
18. Ламари Абдессалем Бен Атри. Математическое моделирование динамических режимов электрических машин переменного тока на основе статических частотных характеристик. Диссертация на соиск. уч. степ. кандидата технических наук. Донецк, ДНТУ.-2004.
19. Калінов А.П., Родькін Д.Й. Апарат діагностики синхронних двигунів. Вісник КДПУ. Зб. наук.праць КДПУ – Вип. – 2 (19).- Кременчук: КДПУ, 2003.
20. Калинов А.П., Черный А.П. Рациональные подходы при определении параметров машин переменного тока. Вісник КДПУ. Зб. наук.праць КДПУ – Вип. – 2 (25).- Кременчук: КДПУ, 2004.-с.115-119.
21. Черный А.П., Родькин Д.И., Сидоренко В.Н., Калинов А.П. Определение параметров АД по непрерывной функции тока статора с дискретным временем. Вісник КДПУ. Зб. наук.праць КДПУ – Вип. – 3 (26).- Кременчук: КДПУ, 2004.-с.123-128.
22. Dr. M. Tu Xuan, C. Ramirez, Dr. B. Kawkabani, Prof. J.J. Simond. Automatic determination of laminated salient-pole synchronous machines parameters based on the finite element method. Swiss Federal Institute of Technology, Electrical Engineering Dept., CH-1015 Lausanne, Switzerland.
23. C. Ramirez, M. Tu Xuan, J.-J. Simond, D. Schafer, Dr C.-E. Stephan. Synchronous machines parameters determination using finite elements method. Swiss Federal Institute of Technology, Electrical Engineering Dept., CH-1015 Lausanne, and Alstom Power Generation Ltd R&D. CH-5242 Birr, Switzerland.
24. Dr. Mai Tu Xuan, Prof. Jean-Jacques Simond, Dr. A. Schwery, P. Regli. Fully automated parameter identification for synchronous machines. Swiss Federal Institute of Technology, EPFL-STI-LME., CH-1015 Lausanne, and Alstom, Switzerland.
25. Каминski В., Школьны С. Метод определения параметров синхронных двигателей, возбуждаемых от постоянных магнитов. Алушта 2003.- с.320-321.
26. Ткаченко А.А. Усовершенствование методики определения частотных характеристик синхронных машин из опытов внезапного трехфазного короткого замыкания. Автореферат магистерской выпускной работы по специальности "Электрические системы и сети" (7.09.06.02). ДНТУ-2002.
27. Харченко В.А. О разбросе значений параметров синхронной машины, находимых из опыта внезапного трехфазного короткого замыкания // Изв РАН. Энергетика. – 1996. - №2. – С. 127-137.
28. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
29. Родькін Д.Й., Калінов А.П., Чорний А.П., Живора В.Ф., Аміров А.М. Спосіб діагностики параметрив синхронного двигуна та пристрій для його здійснення. Деклараційний патент на винахід 65733 А.-2004.

УДК 621.315.175

А.А. Козловский, А.Е. Орлович доц., канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет

Прогнозирование обледенения проводов воздушных линий электропередачи

Рассмотрен способ прогнозирования времени начала обледенения проводов ВЛ электропередачи, путем контроля времени изменения состояния контролируемой поверхности при искусственном ее охлаждении. Описано устройство которое его реализует.
воздушная линия электропередачи, прогноз, обледенение проводов, плавка гололеда

Провода и тросы, подвешенные на опорах воздушной линии (ВЛ), находятся под постоянным действием равномерно распределенной по длине вертикальной статической нагрузки от собственного веса. Кроме того, на них действуют дополнительные нагрузки: вертикальная от гололеда и горизонтальная от ветра.

Вертикальная нагрузка от веса гололеда вызывает наибольшие усилия в проводах. Она нарастает постепенно и по окончании процесса гололедообразования в течении некоторого времени остается постоянной, а затем при потеплении погоды постепенно уменьшается за счет таяния гололедно-изморозевых отложений (ГИО).

При проектировании воздушных линий электропередачи дополнительные нагрузки учитываются исходя из повторяемости наиболее неблагоприятных сочетаний климатических условий для данной местности на основе карт климатического районирования. При этом увеличение периодов повторяемости по мере повышения напряжения линий объясняется требованиями большей надежности линий более высоких напряжений. Поэтому ВЛ низких напряжений (0,4-35 кВ) наиболее подвержены действию экстремальных атмосферных нагрузок, что хорошо подтверждается статистическими данными [1]. Однако, большее усиление их механической прочности нецелесообразно, поскольку период сверхнормативных гололедных нагрузок составляет от 0,03-0,5% от полного срока службы линии [2]. Устранив особые нагрузки такого кратковременного периода, возможно обеспечить надежную работу воздушных линий при снижении их стоимости.

В настоящее время для этого используется плавка гололеда (ПГ) на проводах и тросах переменным или постоянным током – наиболее эффективное средство предупреждения гололедно-ветровых аварий. Она позволяет удалить гололед на десятках километров линий в течении 0,5-1,0 часа, предотвратить опасную перегрузку, пляску и вибрацию проводов [3].

Особенностью гололедно-ветровых аварий является то, что они происходят на больших территориях. В таких условиях проведение плавок гололеда составляет сложную технико-экономическую задачу. Успешное решение которой полностью зависит от уровня автоматизации технологических процессов плавки. Так запоздалая плавка будет и неэффективной, и может даже способствовать развитию аварий. При преждевременной плавке и интенсивном гололедообразовании, продолжительностью сутки и более, может потребоваться проведение повторной плавки, что приводит к перерасходу электрической энергии и увеличивает продолжительность перерывов электроснабжения потребителей.

Поэтому для правильного выбора времени проведения плавки гололеда необходима информация прогнозирующая момент обледенения проводов ВЛ. В

© А.А. Козловский, А.Е. Орлович. 2004

существующих же системах информационного обеспечения ПГ проводится лишь раннее обнаружение и последующий контроль гололедных нагрузок на проводах и тросах воздушных линий электропередачи [3].

Известные способы прогнозирования гололедообразования базируются на контроле метеорологических параметров окружающей среды и носят приближенный характер, так как не учитывают всех метеофакторов, а главное – параметров поверхности провода, которые существенно могут отличаться от параметров других элементов ВЛ и окружающей среды.

Поэтому был разработан способ прогнозирования обледенения проводов ВЛ реализующийся на основе контроля времени τ_o изменения состояния контролируемой поверхности при искусственном ее охлаждении [4], лишенный указанных выше недостатков. Алгоритм прогнозирования следующий: при температуре воздуха, характерной для обледенения проводов ВЛ ($-8 < T_n < 2$, ^oC) одновременно начинаются охлаждение контролируемого участка провода и отсчет времени. В момент появления искусственных гололедных отложений отсчет времени и охлаждение прекращаются, при этом фиксируется время охлаждения τ_o. В дальнейшем через определенные промежутки времени $\Delta\tau$, достаточные для восстановления первичного состояния поверхности участка провода $(\Delta\tau >> \tau_o)$, процесс искусственного охлаждения повторяется. По мере приближения к естественному гололедообразованию, время охлаждения будет сокращаться, а в момент образования естественного гололеда выполнится условие

$$\tau_{oi} = 0\,, \tag{1}$$

Время охлаждения, за которое появится гололед, может быть определено аналитически из уравнения теплового баланса для участка провода ВЛ

$$P_{ox} \cdot \tau_o = dQ_к + dQ_{кап} - dQ_c - dQ_д - dQ_{ту} - Q_л\,, \tag{2}$$

де P_{ox} - мощность охлаждающего устройства; τ_o - время охлаждения;

$dQ_к$ - потери тепловой энергии вследствие конвективного теплообмена между проводом и окружающей средой;

$dQ_{кап}$ - тепло, которое забирается водными каплями;

dQ_c - тепло которое выделяется в проводе вследствие протекания электрического тока;

dQ_m - теплоемкость контрольного участка провода;

$Q_л$ - скрытая теплота, льдообразования.

Момент появления гололеда массой $M_л$ определяется выполнением условия полученного из решения уравнения (2)

$$M_л = \frac{dQ_к + dQ_{кр} - dQ_c - dQ_д - dQ_{ту} - P_o \cdot \tau_o}{L_л} > 0\,, \tag{3}$$

Изменяя в (3) τ_o с определенным шагом, фиксируют его значение, при котором $M_л > 0$. На рис.1 приведены расчетная зависимость $\tau_{o.p} = f(\tau)$ для участка провода АС50/19 ВЛ с номинальным напряжением 10 кВ и экспериментальная $\tau_{o.э} = f(\tau)$ для ВЛ с аналогичными параметрами. Характерная точка *A* отвечает началу процесса обледенения провода.

Анализ кривых $\tau_o = f(\tau)$ показывает, что при упреждении прогноза до 2 ч участки кривых в зоне, которая предшествует обмерзанию с достаточной точностью, могут быть аппроксимированы линейной функцией. Тогда время начала обледенения провода ВЛ, определяется из уравнения

$$\tau_{пр} = \frac{\Delta\tau}{\frac{\tau_o}{\tau_{o+1}} - 1} \tag{4}$$

где τ_i, τ_{i+1} - время охлаждения, соответственно, на *i*-м и *i+1*-м, промежутках измерения τ_o.

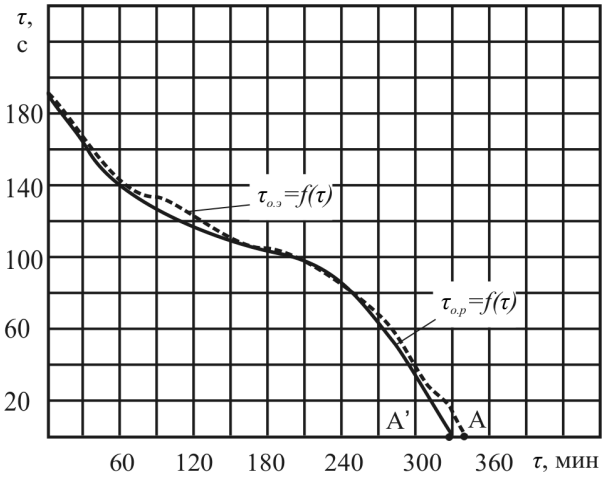


Рисунок 1 – Зависимости времени охлаждения от текущего времени

На основе описанного алгоритма было разработано микропроцессорное устройство функциональная схема которого представлена на рис. 2. Устройство конструктивно разделено на блок датчиков 1, канал передачи данных 2 и микропроцессорный блок 3. Устройство работает следующим образом: в ждущем режиме проводится измерение температуры воздуха датчиком температуры 3.5 и если она находится в пределах $-8 < T_n < 2$ °С то на измерительный блок через блоки кодирования/декодирования информации 3.1, 1.5 и канал передачи данных 2, подается управляющий сигнал на включение микрохолодильника 1.2. В качестве которого использован герметизированный термоэлектрический модуль (ТЭМ) СР1,4-127-06L. Он принудительно будет охлаждать контролируемый участок провода до тех пор, пока датчик гололеда 1.1 не зафиксирует на нем образование искусственного гололеда. При работе ТЭМ датчиками 1.4 фиксируются ток и напряжение в цепи его питания и передаются посредством канала 2 и блоков 1.5, 3.1 на входы K_U, K_I микропроцессорного блока. который вычисляет количество энергии W_o, потраченной на охлаждение контрольного участка провода:

$$W_{тэм} = U_{тэм} \cdot I_{тэм} \cdot \tau_o, \tag{5}$$

где $U_{тэм}$, $I_{тэм}$ – соответственно напряжение и ток в цепи питания термоэлектрического модуля;

τ_o - время работы термоэлектрического модуля.

Из (5) определяется приведенное время работы модуля (независящее от изменений $I_{тэм}$):

$$\tau_{тэм.п} = W_{тем} / P_н, \tag{6}$$

Определение времени из (6) обусловлено наличием нелинейного участка в вольтамперной характеристике ТЭМ.

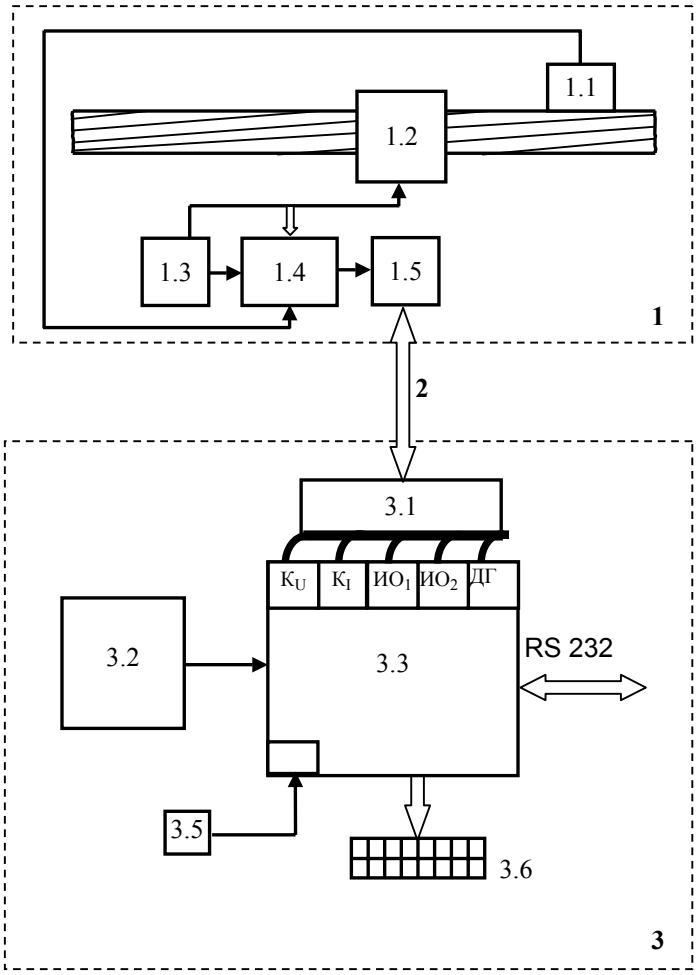


Рисунок 2 – Функциональная схема устройства

Далее, после паузы $\Delta\tau$, при условии усиления гололедной ситуации ($\tau_{o.i-1} > \tau_{o.i}$) цикл измерений повторяется, а время возможного обледенения провода корректируется и выводится на LSD дисплей.

В устройстве предусмотрен интерфейс RS232 который позволяет подключать его к персональному компьютеру, к модулю сотовой связи (GSM модем) и использовать в качестве подсистемы контроля состояния проводов ВЛ более сложных информационных систем.

Таким образом, разработанное устройство прогнозирования времени начала обледенения провода ВЛ, позволяет уменьшить расход электроэнергии плавку гололеда за счет повышения ее эффективности.

Список литературы

1. О массовых авариях в электрических сетях Украины. // *energo.net.ua.* 27/01/2002.
2. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи // Материалы II Всесоюзного совещания. – Уфа, 1975. 187 с.
3. Дьяков А.Ф., Засыпкин А.С., Левченко И.И. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях энергосистем. – Пятигорск: из-во РП "Южэнергонадзор", 2000. 284 с.
4. Деклараційний патент України №53235 МКВ^5 H02G7/16. Спосіб прогнозування обледеніння дротів повітряних ліній електропередач / Козловський О.А., Орлович А.Ю. – Опубл. 15.01.2003. Бюл. №1.

УДК 621.311.1

А.І. Котиш, Н.Ю. Гарасьова, доценти, канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Оцінка визначення ізолюючої спроможності опорних ізоляторів за струмами витоку

В статті розглянуто методи й засоби визначення ізолюючої спроможності підстанційної ізоляції та детально висвітлено один з методів, що базується на вимірюванні струмів витоку ізоляторів, що знаходяться під робочою напругою.
ізоляція, струм витоку, ізолююча спроможність

Підвищення якості ізоляції та всебічний контроль за її станом є одним із основних заходів по підвищенню надійності розподільчих мереж. Оскільки статистика стверджує, що основною причиною аварійних відключень в мережах 10-35 кВ сільськогосподарського призначення є перекриття і пошкодження ізоляції внаслідок її забруднення.

Для підвищення надійності роботи ізоляції необхідністю є визначення ізолюючої спроможності в процесі експлуатації.

Загальна класифікація методів контролю та технічної діагностики ізоляції показана на рис. 1. Перш за все можливо виділити дві групи зазначених методів - руйнівні і неруйнівні.

До руйнівніх методів контролю та діагностики ізоляції слід віднести випробування підвищеною напругою, яке має такий же характер як і експлуатаційна дія, але перевищує її за рівнем.

Найбільш широке застосування набули методи профілактичного контролю, які базуються на неруйнівних випробуваннях ізоляції. Ці випробування визначають не електричну міцність ізоляції, а один або кілька параметрів, що характеризують її стан. До такої системи профілактичного контролю відносять контроль за прогнозованим параметром [1] $x(t)$, котрий прогнозує відказ об'єкту й може бути виміряний, тобто між імовірністю настання відказу в інтервалі $(t, t+\Delta t)$ й значенням параметра, що спостерігається $x(t)$, є стахостичний зв'язок. Розвиток процесу відказу ізоляції високої напруги як правило розвивається саме таким чином [1].

Найбільш точними є прямі методи оцінки ізолюючої спроможності ізоляторів, до яких відноситься вимірювання величини розрядних напруг. Але цей метод найбільш прийнятний в лабораторних умовах, складності ж зв'язані з визначенням розрядних напруг в природних умовах залишають його практично без застосування. В зв'язку із цим більш широко використовують посередні методи приблизної оцінки запасу електричної міцності забруднених ізоляторів.

Посередні методи поділяються на дві групи - неелектричні та електричні. Неелектричні методи контролю (хімічний, оптичний, акустичний) широко застосовуються в основному для визначення характеристик органічних речовин (масляна і кабельна ізоляція). Можливості ж томографічного методу контролю мають дуже широкий спектр, але собівартість обстеження об'єкту контроля за один день складає 93-376 $ [2], окрім того вартість самих тепловізорів (25-35 тис. $) роблять цей метод майже екзотичним. Щодо візуального спостереження забруднення ізоляторів, то кількість забруднюючої речовини ще не вказує на небезпеку перекриття, оскільки

© А.І. Котиш, Н.Ю. Гарасьова. 2004

до її складу можуть не входити іоноутворюючи сполуки, крім того не завжди є можливість для візуального огляду ізоляторів, наприклад в шафах КРЗ. Щодо поведінки ізоляції при поганих погодних умовах (дощ, сніг, туман), то по розміру і кольору часткових розрядів ізоляції ВРП 35 кВ можливо візуально приблизно встановити міру її забруднення, однак в більшості випадків це неможливо, тому що більшість підстінцій 35/10 кВ експлуатуються без постійного обслуговуючого персоналу.

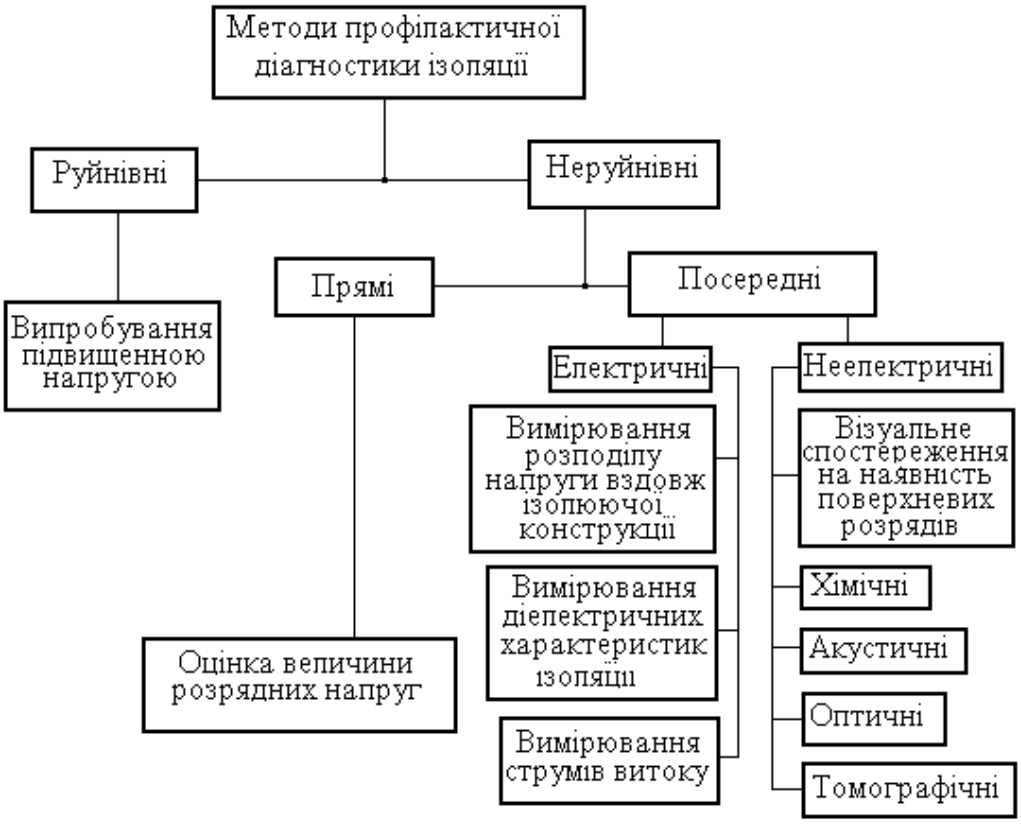


Рисунок 1 - Класифікація методів контролю та технічної діагностики ізоляції

Серед електричних методів контролю широке розповсюдження набув метод вимірювання діелектричних величин, до яких відносяться опір ізоляції (*Різ*), тангенс кута діелектричних втрат (tg δ) і т.і. До його переваг слід віднести безперечну простоту виконання вимірювань, але суттєвим недоліком є той факт, що ці вимірювання можливо провести при виводі силового обладнання з роботи, а також слабий зв'язок зазначених величин з фактичною електричною міцністю ізоляції [3].

Сутність методу вимірювання розподілу напруги вздовж ізолюючої конструкції заключається в порівнянні падіння напруги на окремому ізоляторі, виміряному за допомогою спеціального пристрою, що накладається на ізолятор за допомогою штанги, з відомим "нормальним" розподіленням напруги на таких же ізоляторах або конструкціях. Розподілення напруги вздовж ізолятора або гірлянди залежить від великої кількості факторів, частина з котрих є постійними величинами (тип і кількість ізоляторів, їх розташування, конструкція опори і т. і.) [4]. Вплив же інших факторів (атмосферні умови, забруднення поверхні і т.д.) враховуються досить приблизно на рівні усереднення статистичних даних розподілення напруги. Однак головним є той факт, що по перше даний спосіб застосовують в основному для виявлення дефектів в самому ізоляторі, а не для контролю забруднення його поверхні, а по друге його здійснення можливо лише безпосередньо за участю людини.

Вимірювання струмів витоку ізоляторів також є критерієм при визначенні їх ізолюючої спроможності. Величина струму витоку при заданій напрузі, яка діє на ізолятор, визначається мірою забруднення і зволоження його поверхні.

Спосіб оцінки ізолюючої спроможності ізоляторів по виміряним значенням струмів витоку представляється найбільш прийнятним в процесі експлуатації, тому що дозволяє здійснювати безперервний автоматичний контроль міри забрудненості ізоляторів та ізоляції фаз відносно землі. Це особливо важливо для підстанцій сільськогосподарських районів, більшість з котрих не мають постійного обслуговуючого персоналу. В цьому випадку інформація про небезпечний стан ізоляції могла б передаватися по каналах телесигналізації.

При рикладенні напруги до ізолятора через нього починає протікати струм витоку Ів. При його протіканні по зволоженній і забрудненій поверхні ізолятора поверхневий шар починає нагріватися. Однак внаслідок змінного діаметру вздовж шляху витоку, навіть при рівномірному забрудненні, поверхневий шар підігрівається нерівномірно. Щільність струму витоку в місцях з найменшим діаметром ізолятора $D(l)$ - найбільша, тому очевидно, що підсихання поверхні ізолятора в цих місцях відбувається швидше. Внаслідок цього виникають зони з підвищеним опором, в результаті чого падіння напруги на цих ділянках збільшується. Значне підвищення напруги на підсушених ділянках призводить до виникнення часткових дуг, які шунтують частину шляху витоку.

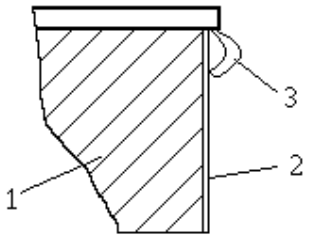
На рис. 2. зображена схема розвитку розряду по поверхні ізолятора. При виникненні часткового розряду по поверхні ізолятора частинка шару забруднення шунтується дугою. Повний опір поверхневого шару, частково шунтовоного дугою при цьому визначиться

$$R_{ш} = R - (r_n - r_д) l_д \tag{1}$$

де r_n - опір зволоженого й забрудненого шару на одиницю довжини;

$r_д$ - опір одиниці довжини дуги;

$l_д$ - довжина дуги.



1-ізолятор; 2-поверхневий шар; 3-електрична дуга

Рисунок 2 - Схема розвитку розряду по поверхні ізолятора

Для стаціонарної дуги залежність між струмом дуги й напруженістю може бути представлена у вигляді [5]

$$E_д = A \cdot I^{-n} \tag{2}$$

де A і n - константи, що залежать від умов горіння дуги.

Тоді для безкінечно малої ділянки ізолятора із змінним діаметром запишемо

$$r_n = \frac{\rho_v}{\pi D(l) \Delta} \tag{3}$$

$$r_д = \frac{A \cdot I^n}{I} = A \cdot I^{-(n+1)} \tag{4}$$

Очевидно, якщо $r_n < r_д$, то $Rш > R$ і струм (5) по поверхні ізолятора зменшиться порівняно з первоначальним струмом (до виникнення часткових розрядів)

$$I = \frac{U}{R - (r_n - r_д) \cdot l_д} \tag{5}$$

Зменшення струму витоку призводить до зростання опору дуги і в свою чергу до подальшого зменшення струму аж до повного згасання дуги.

Якщо ж $r_n > r_д$, то звісно $Rш < R$ і струм по поверхні ізолятора (5) збільшується. Цей факт призведе до подальшого зменшення опору каналу дуги, що в свою чергу сприяє зростанню струму. Сумарний опір поверхні ізолятора зменшується, виникають умови сприятливі до подальшого просування дуги вздовж поверхні ізолятора аж до його повного перекриття.

Таким чином умову перекриття поверхні ізолятора можливо записати так

$$\frac{\rho_v}{\pi D(l) \Delta} \geq A I^{-(n+1)} \tag{6}$$

При перетворенні формули (6) можливо отримати критичний струм витоку по поверхні ізолятора при котрому може виникнути частковий розряд

$$I_{кр} = \left(\frac{A \pi D(l) \Delta}{\rho_v} \right)^{\frac{1}{1+n}} \tag{7}$$

Таким чином, з отриманої формули (7) видно, що струм витоку по поверхні ізолятора залежить від розмірів самого ізолятора, товщини поверхневого шару та його провідності, а також умов довкілля (константи A і n) [6].

Список літератури

1. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. М.: Энергия, 1980. - 112с.
2. Стороженко В.А., Криворучко В.И., Мешков С.Н., Силин А.А. Томография: мировой опыт и пути развития в Украине //Матеріали III Укр. конф. “Неруйнівний контроль та технічна діагностика” - Дніпропетровськ. - 2000. - с. 30-33.
3. Кучинский Г.С. и др. Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов /Г.С. Кучинский, В.Е. Кизеветтер, Ю.С. Пинталь, под общ. ред. Г.С. Кучинского. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 368 с.
4. Абрамов В.Д., Хомяков М.В. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения. М.: Энергия, 1976. - 264 с.
5. Техника высоких напряжений /Под ред. М.В. Костенко. М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.
6. Котиш А.І. Автоматизовані засоби технічної діагностики та електричного контролю за станом ізоляції в сільських електричних мережах: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.11.13 /НТУ “ХПІ”. - Харків, 2001. - 17 с.

УДК 621.793

И.А. Переверзев, А.П. Свиридов, доценты, канд. техн. наук, М.И. Корзаватых
Кировоградский национальный техничесикий университет

Использование аппарата сети Петри для моделирования процесса управления электроэнергетическими объектами

Рассмотрен способ моделирования процесса управления электроэнергетическими объектами на базе использования теории сетей Петри. Предложены типовые структуры позволяющие моделировать все основные ситуации, характерные для деятельности диспечера при управлении электрическими сетями и системами.

сети Петри, оперативно диспечерское управление, электрические сети

Процесс диспетчерского управления электротехническими объектами представляет собой достаточно сложную по структуре последовательность воздействий на объект управления (ОУ).

На основе анализа оперативной деятельности диспетчерского персонала выделим ряд специфических особенностей процесса управления электрическими сетями (ЭС).

Диспетчер осуществляет оперативное управление ЭС в тесной взаимосвязи с оперативным персоналом (подчиненным, руководящим) других объектов. На определенном этапе своей деятельности персонал может воздействовать на ОУ одновременно. Кроме того, подчиненный персонал может самостоятельно принимать решения и выполнять их в соответствии с выбранным способом реализации. При этом возникают ситуации, когда сам диспетчер находится в "режиме ожидания". Иными словами, он не может реализовать следующее управление до окончания выполнения подчиненным персоналом определенного набора действий и получения информации об их выполнении. Например, до получения подтверждения о выполнении ранее отданных распоряжений. На языке моделирования это означает, что параллельные управления должны быть синхронизированы.

В общем случае параллельные процессы возникают тогда, когда одно событие (или состояние ЭС) порождает некоторое множество действий, выполняемых персоналом независимо друг от друга и в произвольной последовательности.

Из существующего ряда формальных систем, используемых в моделировании, хорошим средством для представления параллелизма и учета причинно-следственных связей является сеть Петри [I].

Сети Петри обладают хорошими описательными свойствами, просты по структуре, наглядны и позволяют создавать модели на строгой математической основе. Закон функционирования сети определяется в зависимости от принятой интерпретации. Под интерпретацией сети Петри понимают набор правил, позволяющих однозначно описать поведение моделируемого объекта (процесса).

По определению [I] сеть Петри есть двухдольный ориентированный граф

$$C = (P, T, I, O) \ , \qquad (1)$$

где P - конечное множество позиций;

T - конечное множество переходов;

$I : T \to P$ - входная функция;

© И.А. Переверзев, А.П. Свиридов, доценты, М.И. Корзаватых. 2004

$O: T \to P$ - выходная функция.

Выполнением сети Петри управляет текущая маркировка μ_i. Маркировка есть присвоение фишек позициям сети. Она может быть определена как $\mu = (\mu_1, \mu_2, ..., \mu_n)$, где $n = |P|$. Сеть Петри $MC = (P, T, I, O, \mu)$ есть маркированная сеть.

Сеть Петри выполняется посредством запуска переходов. Переход запускается удалением фишек из его входных позиций и помещением фишек в выходные позиции. Переход запускается только в том случае если $\mu(P_i) \geq \#(P_i, I(t_j))$. Такой переход называется разрешенным. В маркированной сети может быть запущен любой разрешенный переход.

В результате срабатывания разрешенного перехода возникает новая маркировка $\mu'(P_i) = \mu(P_i) - \#(P_i, I(t_j)) + \#(P_i, O(t_j))$. Количество фишек перемещаемых в выходную позицию p_i равно количеству дуг их перехода в позицию P_i.

Представление процесса управления сетью Петри основано на двух понятиях: событиях и условиях. События - это воздействие на объект управления (действия оперативного персонала, возмущения поступающие от внешней среды), имеющие место в разработанном сценарии управления. Возникновением событий управляет состояние процесса управления. Условие - есть логическое описание состояния человеко-машиной системы, определяющее множество событий, которые могут или должны произойти согласно сценария. В сети Петри состояниям соответствуют позиции, событиям - переходы. При этом следует различать два типа переходов: переходы соответствующие действиям диспетчерского персонала и переходы, соответствующие воздействиям на объект со стороны внешней среды.

Переходы первого типа кроме вышеупомянутых условий имеют обязательное условие срабатывания, которое заключается в следующем. Из всех разрешенных текущей маркировкой μ_i переходов t_j срабатывает переход, соответствующий действию, выбранному диспетчером в качестве очередного управления.

Действия оперативного персонала соответствующие переходом t_j, разрешенным текущей маркировкой μ_i, называются допустимыми на данном шаге управления.

Во всех остальных случаях сеть выполняется в еоотвествии с основной интерпретацией [I].

Анализ оперативной деятельности диспетчерского персонала позволил выделить ряд характерных ситуаций и разработать для их описания типовые структуры процесса оперативного управления объектом.

Ситуация I. Существует единственно правильное решение, реализуемое посредством одного действия. Эта ситуапия моделируется структурой I (рис.1).

Переход t_1 является разрешенным при условии $\mu(P_1) \geq 1$. Срабатывание перехода t_1 изменяет разметку: $\mu'(P_1) = \mu(P_1) - 1$; $\mu'(P_2) = \mu(P_2) + 1$.

Начальная разметка $\mu(P_1) = 1$. После срабатывания перехода t_1: $\mu(P_1) = 1$; $\mu(P_2) = 0 \xrightarrow[t_1]{} \mu'(P_1) = 0$; $\mu'(P_2) = 1$.

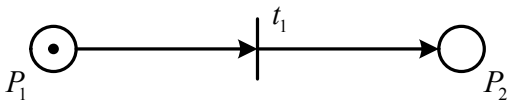
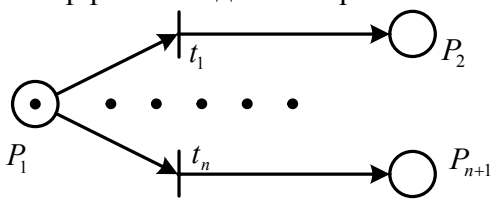


Рисунок 1 - Безусловный переход (“$\to$”)

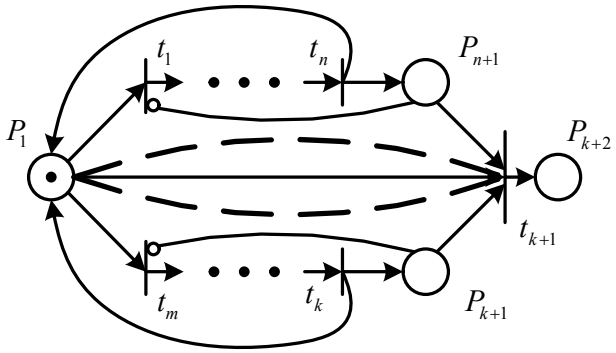
Ситуация 2. Существует n альтернативных решений, реализуемых посредством одного из равноценных действий. Выполнение любого из n действий исключает все остальные варианты (рис.2). Срабатывание любого из переходов делает остальные переходы неразрешенными. Условием срабатывания перехода является субъективный выбор решения диспетчером.



$$\mu(P_1)=1;\ \forall\mu(P_i|\ i=2,...,n+1)=0\xrightarrow[t_i\in T]{}$$
$$\mu'(P_1)=0,\ \mu'(P_{j+1})=1;$$
$$\mu'(P_i|\ i=2,...,n+1; i\neq j+1)=0;$$

Рисунок 2 - Выбор “или”

Ситуация 3. Существует единственное решение, реализуемое посредством нескольких действий, выполняемых в произвольной последовательности (рис.3). Для исключения повторных срабатываний переходов в структуру введены расширения сети Петри - сдерживающие дуги. Графическое изображение - кружок у конца дуги. Интерпретация : переход t_j заперт, если в позиции, из которой в данный переход напрвлена сдерживающая дуга $\mu(P)\geq 1$.

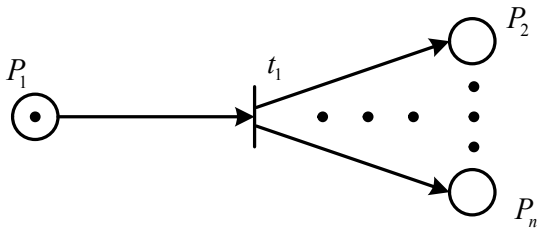


$$\mu(P_1)=1;$$
$$\mu(P_i|\ i=2,...,n,n+1,...,m,...,k,k+1,k+2)=$$
$$=0\xrightarrow[\{t_j|j=1,...,n\}V...V\{t_j|j=m,...,k\}]{}$$
$$\mu'(P_{k+2})=0$$
$$\mu'(P_i|\ i=1,...,n,...,m,...,k+1)=$$
$$=1\xrightarrow[t_{k+1}]{}\mu''(P_{k+2})=1,\mu(P_i)=0.$$

Рисунок 3 - Выбор”и”

Приведенные выше ситуации описывают деятельность одного человека при управлении объектом. В общем случае реальный процесс управления содержит описание деятельности и взаимодействие группы людей, участвующих в тренировке. Для моделирования групповой деятельности введены структуры, обеспечивающие распараллеливание процесса управления и его синхронизацию во времени.

Ситуация 4. Воздействие на объект управления (соответствующее переходу t_1) приводит к возникновению n независимых (параллельных) процессов управления этим объектом (рис.4)



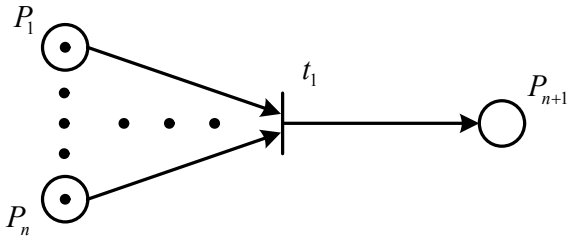
$$\mu(P_1)=1;\ \mu'(P_i|\ i=2,...,n)=0\xrightarrow[t_1]{}$$
$$\mu'(P_1)=0;\ \mu'(P_i|\ i=2,...,n)=1.$$

Срабатывание перехода t_1 активизирует процессы $P_2\div P_n$.

Рисунок 4 - Разделение ”<”

Ситуация 5. Действие, соответствующее переходу t_1 выполняется только после

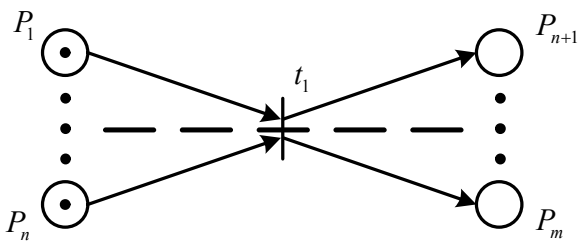
завершения процессов $P_1 \div P_n$. В общем случае действие может быть фиктивным. Тогда переход t_1 соответствует условию окончания процессов $P_1 \div P_n$ (рис.5).



$$\mu(P_i \mid\ i = 1,...,n) = 1; \mu(P_{n+1}) = 0 \xrightarrow[t_1]{}$$
$$\mu(P_{n+1}) = 1; \mu'(P_i \mid\ i = 1,...,n) = 0.$$

Рисунок 5 - Соединение ”>”

Ситуация 6. При реализации параллельных воздействий на объект управления необходимо их согласование во времени (синхронизация). Переход t_1 разрешен при условии, что процессы $P_1 \div P_n$ завершены. Срабатывание перехода t_1 активизирует процессы $P_{n+1} \div P_m$ В общем случае действие, соответствующее переходу t_1 может быть фиктивным, а $n \neq m - n$ (рис.6).

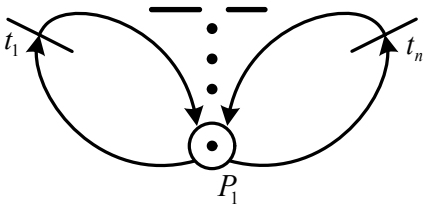


$$\mu(P_i \mid\ i = 1,...,n) = 1;$$
$$\mu(P_j \mid\ j = n+1,...,m) = 0 \xrightarrow[t_1]{}$$
$$\mu'(P_i \mid\ i = 1,...,n) = 0;$$
$$\mu'(P_j \mid\ j = n+1,...,m) = 1.$$

Рисунок 6 - Синхронизация

Ситуация 7. Цель управления может быть достигнута многократным повторением некоторого количества действий. Число действий (*n*) определяется имеющимися в распоряжении диспетчера арсеналом средств по управлению объектом в данной ситуации. Причем может быть использовано любое количество управлений в пределах от 0 до *n.* Условием выхода из цикла является вывод ОУ на требуемый режим работы.

Как правило данная структура используется для моделирования регулирования параметрами режима электрической сети (*P,Q,U,f* и т.п.)



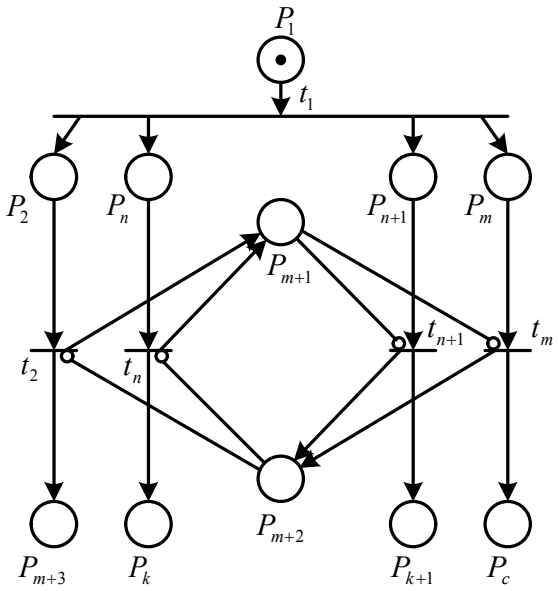
$$\mu(P_i) = 1 \xrightarrow[(t_1 V ... V t_n)^{(l)}]{}$$
$$\mu(P_i) = 1$$

Рисунок 7 - Цикл (“@”)

Ситуация 8. Сущетвует *n* альтернативных взаимоисключающих решений, каждое из которых реализуется посредством группы независимых действий. Это могут быть ситуации, когда диспетчер параллельно решает несколько задач, например, по

руководству одновременной независимой работы подчиненного персонала (оперативно-выездными бригадами, диспетчерами подстанций и т.п.). В этом случае моделирующая структура является составной и обеспечивает реализацию схемы "ИЛИ-И". Переход t_1 является фиктивным и служит для моделирования условий выполнения m первоначально независимых (параллельных) процессов управления объектом (Рис.8).

Контроль выбранного решения после начала его реализации (переходы $t_2,...,t_n,...,t_m$) обеспечивается появлением фишки в соответствующих позициях P_{m+1} или P_{m+2}, эта запрещает запуск переходов $t_2,...,t_n$ или $t_{m+1},...,t_m$.



$$\mu(P_1)=1$$
$$\mu(P_i \mid i=2,...,n+1,...,m)=0$$
$$\xrightarrow[t_1]{} \mu'(P_i)=1$$
$$\mu'(P_i) \xrightarrow[t, j(j=2,...,n)]{} \mu''(P_i \mid i=m+j+1)=1,$$
$$\mu''(P_j)=0, \mu''(P_{m+1})=\mu(P_{m+1})+1.$$

Переходы $t_{n+1},...,t_m$ заперты.

$$\mu'(P_i) \xrightarrow[t, j(j=n+1,...,m)]{}$$
$$\mu''(P_i \mid i=m+j+2)=1,$$
$$\mu''(P_j)=0, \mu''(P_{m+2})=\mu'(P_{m+2})+1.$$

Переходы $t_2,...,t_n$ заперты.

Рисунок 8 – Выбор “И” с контролем (“\”)

Приведенные моделирующие структуры позволяют моделировать основные типы ситуаций, характерных для деятельности диспетчера. Более сложные ситуации могут быть представленны как композиции типовых структур.

Выполняя операцию присоединения над типовыми структурами, можно получать достаточно сложные, многовариантные сценарии процесса оперативного управления.

Список литературы

1. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем.-М.:Мир,1984.-264с.
2. Самойлов В.Д., Березников В.П., Писаренко А.П., Сметана С.И. Автоматизация построения тренажёров и обучающих систем.-Киев:Наукова думка,1989.-200с.
3. Клыков Ю.И. Ситуационное управление большими системами.-М.:Энергия,1974.-136с.

УДК.621.321

І.В Савеленко, **С.П. Плєшков, доц., канд. техн. наук**
Кіровоградський національний технічний університет

Економічна ефективність керування графіками навантажень переробними підприємтвами сільського господарства

Проаналізовані добові графіки навантажень переробних підприємств. Визначені коефіцієнти, що характеризують оптимальний режим електроспоживання. Приведені розрахунки визначення плати за електроенергію при використанні різних тарифних моделей.
режим електроспоживання, графіки наванаження, тариф, плата за електроенегію

Оптимальний режим роботи системи електропостачання визначається умовою мінімізації втрат. Тому і задачу економічної роботи підприємств можна сформулювати слідуючим чином: зниження до можливого рівня затрат на виробництво продукції при мінімінізації затрат на енергетичні ресурси та умові забезпечення встановленої якості.

Циклічний характер життєдіяльності суспільства обумовлює нерівномірність добового графіка навантаження енергосистеми країни із явно вираженими ранковими і вечірніми максимумами та зоною нічного провалу. Споживання електричної енергії задається у вигляді добових графіків навантаження енергосистеми, що характеризують споживану потужність $P(t)$ в будь-який момент часу t.

Графік електроспоживання, що характеризує навантаження споживачів, дає можливість проаналізувати режим роботи підприємства.

Форма графіку навантаження залежить від особливостей технологічного процесу. Так як проводити аналіз графіків за кривою електроспоживання не зручно, то аналіз електроспоживання проводять за добовими графіками навантаження.

Нерівномірність графіку навантаження енергосистеми визначається режимами електроспоживання сукупності електроспоживачів. Відомо, що певною мірою на режим електроспоживання може впливати тариф на електроенергію. Для фінансових розрахунків між енергокомпаніями, енерговиробниками і споживачами встановлені системи тарифів на за електроенергію[1].

Отже, приймаючи ту чи іншу тарифну систему оплати можна впливати на режим електропостачання. Зрозуміло, що для кожного конкретного випадку величина електроспоживання є індивідуальною, тому задачу по оптимізації електроспоживання проводимо на основі характерних графіків переробних підприємств сільськогосподарськоі галузі.

Практично всі технологічні режими сільськогосподарських підприємств можуть бути здійснені в режимі регулювання електроспоживання, але вони пов’язані з появою додаткових втрат.

При умові стійкої роботи підприємства та збереження технологічного процесу, сумарна потужність, що може бути знижена знаходиться:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{n} \Delta P_i \qquad (1)$$

де, ΔP_i - потужність, що може бути знижена замкненою технологічною ланкою.

В свою чергу:

© І.В Савеленко, С.П. Плєшков. 2004

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^{n} \Delta P_j \qquad (2)$$

де, ΔP_j - потужність j – ї установки, що може бути знижена, без зміни технологічного процесу.

Далі дану задачу можна вирішувати декількома шляхами. Найбільш поширені слідуючі напрямки:

- зменшення електроспоживання за рахунок ущільнення графіка навантаження та зниження максимуму заявленої потужності підприємства (рис. 1);
- зниження електроспоживання за рахунок зсуву піку навантаження підприємства відносно максимуму енергосистеми(рис. 2).

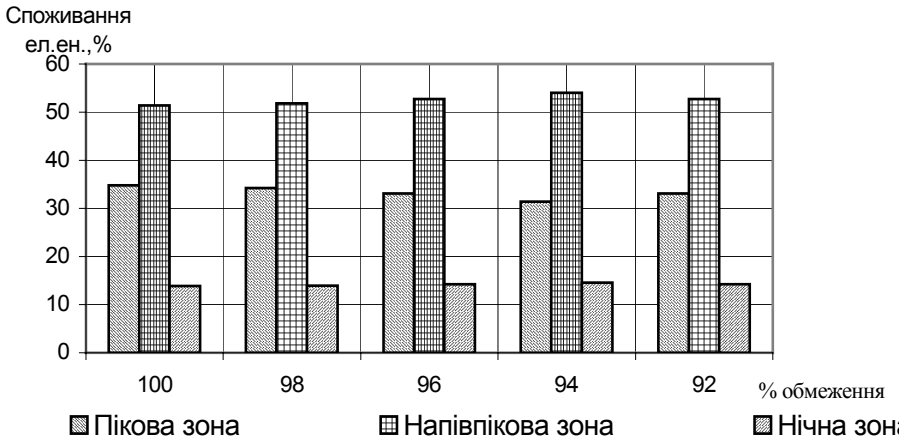


Рисунок 1 - Динаміка споживання електроенергії при ущільнені графіку навантаження переробних підприємств сільського господарства

Виконання того чи іншого рішення несе в собі додаткові затрати , що пов’язані з зміною режиму роботи працюючого обладнання, які умовно позначимо:

$$B(\Delta P) = \sum_{i=1}^{n} B(\Delta P_i) \qquad (3)$$

Визначаємо максимально можливе зменшення або збільшення затрат при зменшенні потужності електроспоживання:

$$\max \Delta B = \alpha \Delta P_i - B(\Delta P) \qquad (4)$$

В такому випадку плата за електричну енергію визначаємо за формулою:

$$П = \alpha(P - P') + \beta(E - E') \pm \max \Delta B \qquad (5)$$

де, α, β - основна та додаткова тарифні ставки відповідно грн/кВт, грн/кВт-г;

P′- максимально споживана потужність при зміні роботи обладнання;

E′ - спожита електрична енергія при зміні технологічного режиму роботи.

При умові використання диференційних тарифів плату за електричну енергію визначаємо за формулою:

$$П = \alpha_П (E_П - E`_П) + \alpha_{НП} (E_{НП} - E`_{НП}) + \alpha_Н (E_Н - E`_Н) \qquad (6)$$

де $\alpha_П, \alpha_{НП}, \alpha_Н$ – тарифні ставки в піковій, напівпіковій та нічній зонах відповідно;

$E_П, E_{НП}, E_Н,$ – споживання електроенергії в піковій, напівпіковій та нічній зонах відповідно.

$E`_П, E`_{НП}, E`_Н,$ – споживання електроенергії в піковій, напівпіковій та нічній зонах після корекції електроспоживання.

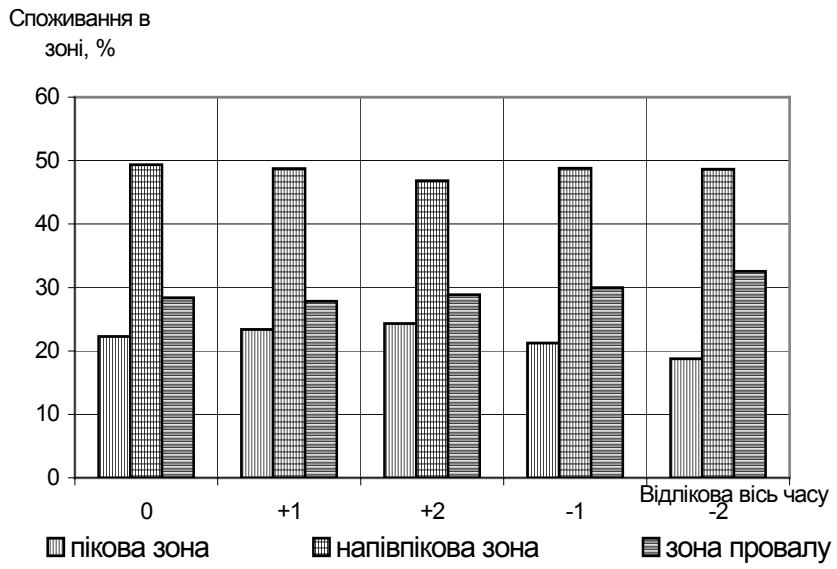


Рисунок 2 - Гістограма споживання електричної енергії по зонам доби при зсуві графіку навантаження сільськогосподарських переробних підприємств

Використання почасових тарифів та тарифів з складовими, що враховують потужність та енергію не дають споживачу у повною мірою використовувати весь механізм керування навантаженням споживача [3].

Тому в даному питанню перевагу надають диференційованим тарифам. На даному етапі, енергосистема пропонує споживачам диференційовані тарифи за періодами часу. Необхідно зауважити, що перехід на даний тип розрахунків за електроенергію не можливий без використання автоматизованих систем обліку та контролю електроенергії.

Автоматизовані системи обліку та контролю електричної енергії дають можливість контролювати обсяг електроспоживання споживачів сільськогосодарських підприємств у будь-яким момент часу. Таким чином, при наявності регулювальних потужностей або впроваджені енергозберігаючих заходів на переробних с.-г. підприємствах, споживач може зменшити обсяг електроспоживання в періоди максимальної тарифної ставки за електроенергію.

Звідси потужність, що може бути з'єкономлена споживачем можна знайти за формулою:

$$P' = P_{\Sigma} - P_{H} - \sum_{i=1}^{t} P_{Pi} k_i - \sum \Delta P_{TX} \,, \tag{7}$$

де P_{Σ} - потужність в *i*-момент часу, що заявлена в енергосистемі;

P_{H} - потужність споживача, що не лімітується;

P_{Pi} - потужність споживача, що регулюється;

P_{TX} - складова, що враховує витрати на власні потреби, втрати в лініях і т.д.;

k_i - коефіцієнт, що враховує регулювальну здібність споживача в *i*-момент часу.

Використання диференційного тарифу дозволяє переробним підприємствам отримувати виграш *B* при місячній сплаті за електроенергію.

$$B = \int_{1}^{30} \left(P_{\Sigma} - P'\right) dt \tag{8}$$

Але аналізуючі добові графіки с.-г. підприємств можна стверджувати, що збільшення щільності графіку навантаження на $\Delta К_{н.с.}$ може викликати збільшення втрат у споживача на деяку величину ΔB. Тому впровадження будь-якого заходу пов'язане зміною графіку навантаження повинне попередньо узгоджуватися з попереднім техніко-економічним розрахунком.

Для визначення оптимального режиму електроспоживання напереробних підприємствах с.-г. аналізувалися коефіцієнти, що характеризують форму графіку навантаження та тарифні коефіцієнти по зонах доби. Основними характеристиками є максимальне, мінімальне та середньодобове навантаження P_{max}, P_{min} і $P_{ср}$, коефіцієнт заповнення $\beta = P_{ср} / P_{max}$, нерівномірність навантаження $К_{нс.} = P_{min} / P_{max}$ [3].

В таблиці 1 приведені значення коефіцієнтів *К*п, *К*пп та *К*н, що визначають частки вартості електроенергії відповідно в піковій, полупіковій та нічній зонах при виконанні корекції графіків переробних підприємств.

Таблиця 1

% обмеження в піковій зоні	Значення коефіцієнтів, що визначають частки вартості електроенергії що припадають на пікову, полупікову та нічну зони, %								
	При простому обмежені електроспоживання			При перерозподілі енергії з пікової зони в полупікову зону			При перерозподілі енергії з пікової зони в нічну і полупікову зони		
	Кп	Кпп	Кн	Кп	Кпп	Кн	Кп	Кпп	Кн
3	41,63	49,94	7,89	41,63	50,27	7,89	41,63	50,14	7,95
6	41,09	49,94	7,89	41,08	50,59	7,89	41,08	50,33	8,00
9	40,55	49,94	7,89	40,55	50,92	7,89	40,55	50,53	8,07
12	40,01	49,94	7,89	40,01	51,26	7,89	40,01	50,73	8,12

Узагальнюючи можна зробити висковки, при подальшому зростанню цін на електроенергію диференційні тарифи, що впливають на форму графіка навантаження підприємств переробної галузі будуть дуже актуальні. Ефективність економічного керування електроспоживанням, що в основному визначається впливом на максимум графіка навантаження сільськогосподарських підрипємств дозволить зменшити капіталовкладення на введення нових генеруючих потужностей.

Ефективність від керування графіками навантаження переробних підприємств залежить не тільки від форми графіку навантаженя, а також від тарифних ставок по зонах. Впровадження заходів, що змінюють форму графіку навантаження: зрізання піків, заповнення графіку навантаження, зсув навантаженя, енергозбереження дають можливість підприємству отримати економічний зиск, а енергосистема має виграш через зменшення нерівномірності попиту на електроенергію.

Список літератури

1. Михайлов В.В Тарифы и режимы электропотребления. 2-е изд., перераб и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986.. – 216 с.
2. Волконский В.А., Кузовкин А.И. Оптимальные тарифы на электроэнергию – инструмент энергосбережения. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 160 с.
3. Гордеев В.И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей. - М.: Энергоатомиздат, 1986. -158 с.

УДК 621.313

С.А. Сергиенко, доц., канд. техн. наук, А.П. Черный, проф., канд. техн. наук
Кременчугский государственный политехнический университет

О необходимости испытаний электрических машин с учетом технологической нагрузки

В статье обоснована необходимость проведения послеремонтных испытаний электрических машин с учетом технологических режимов работы. Разработана структура испытательного комплекса двигателей постоянного тока, обеспечивающего формирование требуемой технологической нагрузки, анализ тепловых режимов, состояние механических узлов, определение ресурса работоспособности.
послеремонтные испытания, ресурс работоспособности, формирование технологической нагрузки

Введение

Электрические машины постоянного и переменного тока, входящие в состав электроприводов, являются неотъемлемой частью большинства технологических механизмов любой отрасли промышленности. Некачественное обслуживание, нарушения режимов работы электроприводов (повышение скорости нарастания тока якорной цепи, увеличение среднего тока и т.д.), старения конструкционных материалов (температурное повреждение изоляции и активной стали, усталость и износ подшипников) приводит к выходу из строя электрических машин.

Финансовые трудности, не позволяющие осуществлять плановую замену оборудования, послужили первоочередной причиной создания и развития электроремонтной отрасли. Причем вышедшие из строя электрические машины ремонтируются, как правило, не на специализированных предприятиях, а электроремонтных участках, созданных как отдельная структура внутри предприятия. При этом качество ремонта по технологическим показателям, как правило, не отвечает уровню технологии производства электрических машин даже при одинаковых характеристиках используемого ремонтного оборудования и материалов вследствие чего параметры отремонтированной машины (электрические и энергетические) не соответствуют параметрам и характеристикам машины до ремонта. Использование такой машины в прежнем технологическом процессе приводит к быстрому повторному выходу ее из строя. В качестве примера приведена статистика ремонта электродвигателей на ОАО «ЭЛЕМАШ» (рис. 1). Из приведенных данных видно, что, в среднем свыше 50% всех двигателей возвращаются на повторный ремонт в течение года.

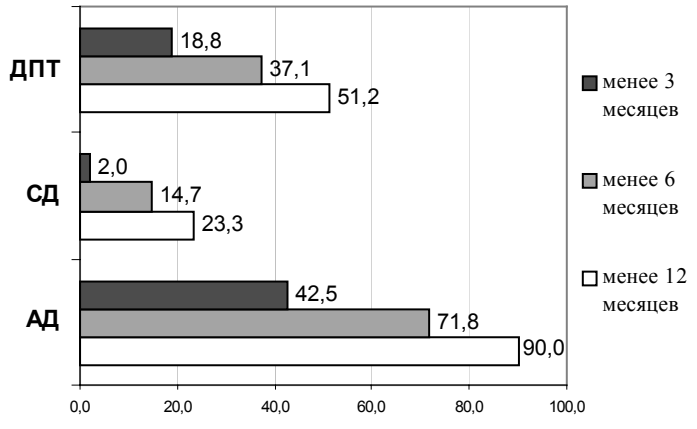


Рисунок 1 - Статистические данные межремонтного периода электрических машин средней мощности за 2003 год на ОАО «ЭЛЕМАШ» г.Комсомольск

© С.А. Сергиенко, А.П. Черный. 2004

Такие показатели в первую очередь обусловлены тем, что в силу отсутствия современного дорогостоящего испытательного оборудования, а также исходя из технико-экономических соображений, ремонтные предприятия проводят минимальный объем испытательных операций при сдаточных испытаниях готового оборудования (например, обкатка электрической машины на холостом ходу, испытания изоляции повышенным напряжением) полагая, что параметры и характеристики электрических машин до и после ремонта неизменны [1,2]. В действительности, в ходе ремонтных операций происходят неизбежные повреждения пакета стали в части распушения и закорачивания листов, изменения свойств стали из-за повторных отжигов, что ведет к снижению нагрузочной способности, росту тока холостого хода, увеличению потерь [3], появлению сил магнитного тяжения, приводящих к повышению уровня вибрации и снижению ресурса подшипниковых узлов и изоляции обмоток.

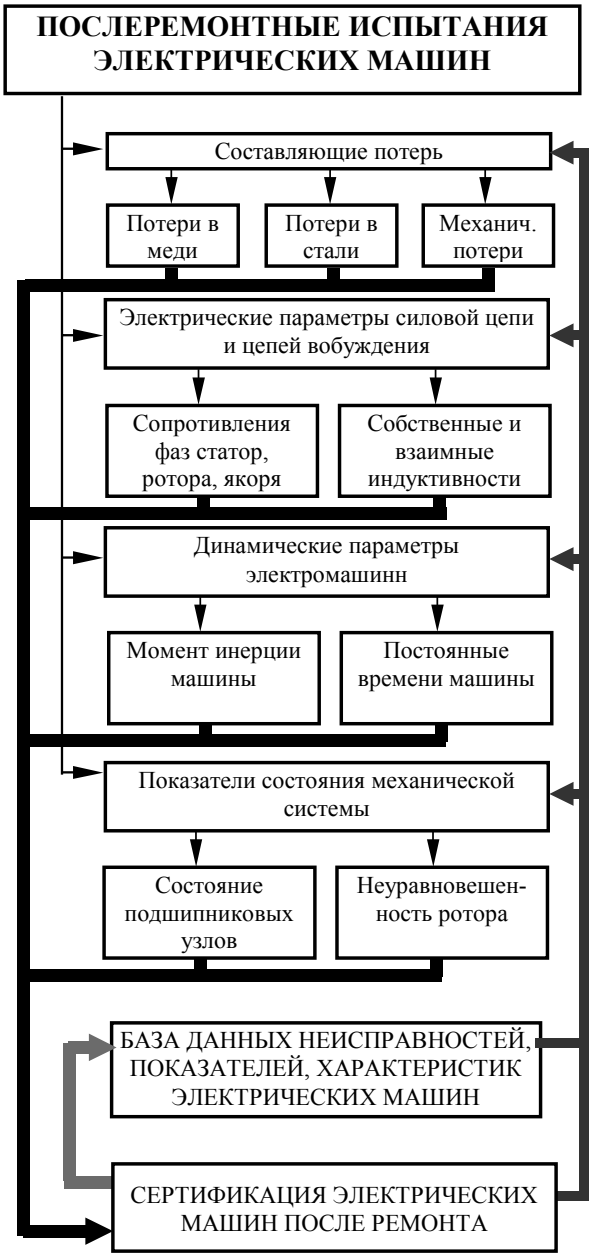


Рисунок 2 - Структура послеремонтного сертифицирования электрических машин

Это указывает на необходимость определения нового паспорта электрической машины, прошедшей ремонт. Определение послеремонтных параметров и характеристик осуществляется по результатам нагрузочных испытаний с использованием механических или электромеханических нагрузочных устройств. Недостатки таких систем нагружения, связанные с несоответствием испытаний реальным эксплуатационным режимам, длительности и трудоемкости подготовки к испытаниям, закреплением двигателя на фундаментной плите и механическим агрегированием, необходимостью иметь широкий парк вспомогательного оборудования для электрических машин различной мощности и исполнения, делают очевидным необходимость усовершенствования послеремонтных испытаний за счет применения новых технических решений и автоматизированных измерительно-диагностических комплексов.

Анализ современных методов и систем для испытаний электрических машин показал, что наиболее перспективным является метод динамического нагружения [4]. Системы нагружения на его основе позволяют реализовать широкий класс нагрузок и диагностических режимов, принципиально нереализуемых в системах статического нагружения [1,2,5]. Исключение внешних нагрузочных устройств существенно снижает время

монтажа испытываемой машины, и соответственно увеличивает производительность. К тому же использование управляемых преобразователей позволяет создавать универсальные диагностические центры и станции, пригодные для испытания машин различных как по мощности, так и типу питания [6,7].

Неотъемлемой частью систем динамического нагружения являются измерительно-диагностические комплексы (ИДК) на базе современных микропроцессорных устройств, что позволяет не только значительно упростить технологию проведения испытаний под нагрузкой, но и повысить их достоверность и информативность (рис.2).

Отличительной особенностью компьютеризированных испытательных комплексов является обработка мгновенных значений контролируемых величин [8,9]. Такой подход позволяет выйти на качественно новый уровень анализа процессов, имеющих место в электроприводе.

Необходимо особенно отметить что, наряду с определением параметров и характеристик отремонтированной электрической машины (определением нового паспорта) такие системы способны осуществлять прогнозирование - определение ресурса электрической машины. Решение данного вопроса не возможно без учета характера технологической нагрузки для каждой группы механизмов или конкретного электропривода.

Цель работы

Обоснование необходимости формирования конкретной технологической нагрузки при послеремонтных испытаниях электрических машин для определении фактического ресурса работоспособности.

Материалы и результаты исследований

Анализ режимов работы электроприводов различных производственных механизмов показал, что их нагрузочные диаграммы цикла работы схожи между собой и имеют вид, представленный на обобщенной диаграмме (рис.3).

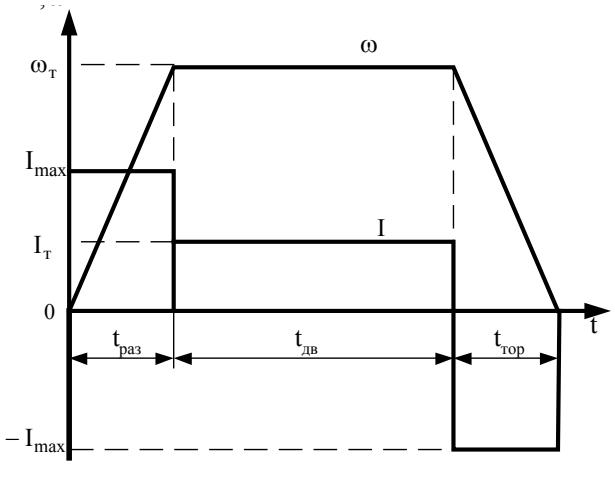


Рисунок 3 - Обобщенная нагрузочная диаграмма электропривода

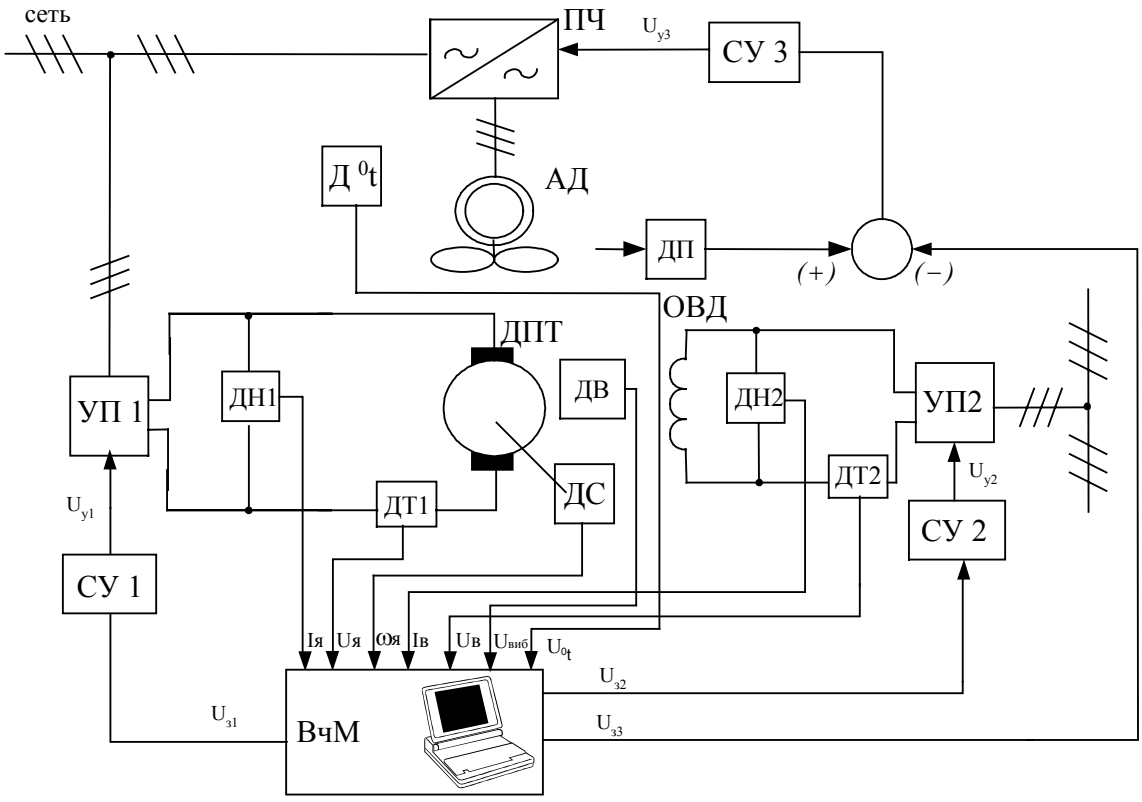
Значения тока (момента), скорости вращения и времени для каждого типа привода различно на отдельных участках диаграммы. Например, для электровоза время цикла может составлять от 20 минут и выше, а нагрузка зависит от количества вагонов, характера перевозимого груза, от прямолинейности и угла наклона пути. В электроприводе механизма передвижения автопогрузчика время цикла составляет 1–5 мин., а нагрузка обуславливается весом перевозимого груза. Время движения $t_{дв}$ зависит от длинны пути, а время разгона $t_{раз}$ и торможения $t_{тор}$ - от инерционности системы и может составлять 2–3 с для привода автопогрузчика, и 1–3 мин. для электровоза. Максимальный ток на участках разгона и торможения достигает (2÷2.5)Iн, а для высокомоментных двигателей (6÷7)Iн. Технологическая скорость $\omega_т$ на равномерном участке зависит от требований предъявляемых к технологическому процессу и может отличаться от номинальной.

Необходимо отметить, что для ряда технологических механизмов нагрузочная диаграмма имеет более сложный характер: изменение момента сопротивления в широких пределах при постоянной скорости, изменение скорости при постоянной нагрузке, момент сопротивления может носить ударный характер, изменяться резкопеременно. В переходных режимах для отдельных приводов (робототехнические комплексы) разгон осуществляется по сложному (например, параболическому) закону или ступенчато. Следящие электромеханические системы работают в динамических режимах, поэтому участки с установившейся скоростью в них практически отсутствуют. Наиболее показательным в плане сложного характера изменения момента сопротивления является работа механизмов, относящихся к классу землеройных машин, а также подъемно-транспортных механизмов.

Традиционные испытательные системы предполагают нагружение электрической машины номинальным моментом при номинальной скорости, не учитывая возможные токовые перегрузки, скорость нарастания тока, рывки, ускорения и т.п соответствующих реальным режимам работы.

Это указывает на необходимость формирования режимов, эквивалентных технологическом при послеремонтных испытаниях электрических машин, что позволит на основе анализа тепловых режимов и состояния механических узлов определить фактический остаточный ресурс работы испытуемой электрической машины.

На рис. 3 приведена обобщенная функциональная схема испытательного и диагностического комплекса для послеремонтных испытаний двигателей постоянного тока, который реализует способ управления процессом нагружения с формированием заданной технологической нагрузки и обеспечением требуемого температурного режима.



С

У – система управления, УП – управляемый преобразователь, ВчМ – вычислительный модуль, ПЧ – преобразователь частоты, ДН, ДТ, ДВ, ДС, ДП, Дt – датчики напряжения, тока, вибрации, скорости, производительности вентилятора, температуры

Рисунок 4 - Функциональная схема ИДК для послеремонтных испытаний двигателя постоянного тока

В качестве УП в общем случае используется тиристорный или транзисторный преобразователь, электромашинный усилитель, генератор постоянного тока. Якорная цепь испытуемой машины может быть подключена к регулируемому источнику тока, позволяющему однозначно формировать требуемую нагрузочную диаграмму. Тогда соблюдение тахограммы осуществляется за счет воздействия на обмотку возбуждения, т.е. ослаблением потока.

Для испытания электрических машин с принудительной вентиляцией комплекс содержит вентиляторную установку, приводным устройством которой служит асинхронный двигатель, подключенный к сети через преобразователь частоты.

Задающие сигналы U_y могут представлять собой сложную гармоническую функцию, поэтому к системам управления в первую очередь предъявляются требования к высокому быстродействию и точности в динамических режимах, устойчивости и нечувствительности к параметрическим и возмущающим воздействиям.

Классические системы управления обладают рядом существенных недостатков [10,11], что затрудняет их применение для систем динамического нагружения. В [12] рассмотрена система управления с переменной структурой (режим токоограничения на участках разгона и торможения, динамическое нагружение с контролем тока холостого хода на участках с неизменной скоростью), не требующая сложной технической реализации и позволяющая снизить ошибку регулирования до 1%. Анализ существующих принципов построения систем управления с низкой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям показал целесообразность использования для систем формирования технологической нагрузки систем автоматического управления, устойчивых при неограниченном коэффициенте усиления [13-15], полностью отвечающих приведенным выше требованиям. Использование цифровых систем управления позволит реализовать высокий коэффициент усиления и сложную структуру синтезированных регуляторов.

При формировании технологической нагрузки в ходе испытаний необходимо учитывать тот факт, что реальный технологический механизм обычно обладает значительно большей инерционностью, чем испытуемый двигатель. Поэтому для соблюдения реальной тахограммы скорости испытания необходимо проводить при ослабленном потоке. Ослабление магнитного потока в свою очередь приводит к уменьшению потерь в стали, обусловленных процессом перемагничивания и вихревыми токами, а соответственно и изменению теплового режима работы электрической машины.

Обеспечение температурного режима является основной задачей организации охлаждения электрических машин. Учет условий нагревания и особенности теплоотвода осуществляется путем воздействия на вентиляционную систему двигателя (уменьшения потока охлаждающего воздуха), что дает возможность эквивалентизировать в тепловом отношении технологический и испытательный режимы.

Важно отметить, что реальное взаимодействие перечисленных выше факторов в полной мере не рассмотрено и является тем элементом, изучив который появится возможность решить основную задачу определения ресурса электрической машины в определенных технологических условиях.

Правильный подход в проведении испытаний, учет конкретной технологической нагрузки позволит не только определить вероятностный период безаварийной роботы отремонтированной машины, но и разработать рекомендации по дальнейшему ее возможному использованию в случае, если машина не может быть возвращена в прежний технологический процесс.

Список литературы

1. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1976.-248с.
2. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
3. Родькин Д. И., Черный А.П., Сычев С.Д., Мартыненко В.А. Характеристики асинхронного двигателя с учетом старения стали// Електротехніка і електромеханіка. Харків. НТУ „ХПІ”, 2004. - №1. – С.53-56.
4. Родькин Д. И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. – М.: Недра, 1992. –242 с.
5. Коварский Е. М., Янко Ю. И. Испытание электрических машин. -М.: Энергоатомиздат, 1990. – 317 с.
6. Луговой А.В., Родькін Д.Й. Випробувальний комплекс для діагностики електричних машин // Електроінформ. 2001. №1. С.14-16.
7. Комплексы для экспресс-диагностики двигателей переменного тока. Родькин Д.И., Черный А.П., Калинов А.П., Барвинок Д.В., Хараджян А.А., Здор И.Е. Никитина А.В., Живора В.Ф., Величко Т.В. Сборник научных трудов НГУ. – Днепропетровск. НГУ, 2003, Т. 2, №17. – С. 110-121.
8. Черный А.П., Родькин Д.И., Сидоренко В.Н., Калинов А.П. Определение параметров АД по непрерывной функции тока статора с дискретным временем //Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 2(25). – С.123-127.
9. Гладырь А.И., Родькин Д.И. и др. Возможности компьютеризированных измерительно-диагностических комплексов при решении задач электромеханики. – Научные труды КГПИ. Вып. 1/2000 (8) – Кременчуг: КГПИ, 2000.- С.119-123.
10. Гарнов В.К., Рабинович В.Б., Вишневецкий Л.М. Унифицированные системы автоуправления электроприводами в металлургии. – М.: Металлургия, 1971. – 216с.
11. Фишбейн В.Г. Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода постоянного тока. – М.: Энергия, 1971. – 136с.
12. Скворцов И.В., Зачепа Ю.В., Сергиенко С.А. Формирование технологической нагрузки при послеремонтных испытаниях двигателей постоянного тока //Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 2(25). – С.50-52.
13. Марущак Я.Ю. Синтез регуляторів електромеханічних систем постійного струму методом узагальненого характеристичного полінома// Технічна електродинаміка. – 2000. – №2. – С.72-77.
14. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами /А.В.Садовой, Б.В.Сухинин, Ю.В.Сохина.: Под ред. А.В.Садового. – К.: ИСИМО, 1996. – 298с.
15. Сергиенко С.А. Повышение качественных показателей систем подчиненного регулирования электроприводов на основе модифицированного принципа симметрии: Дис…канд. тех. наук: 05.09.03. – Кременчуг, 2004. – 221с.

УДК 621.311.004

С.В. Серебренніков, доц., канд. техн.наук
Кіровоградський національний технічний університет
О.І. Кондратьев
ВАТ "Черкаське хімволокно"

Енергозбереження в регульованих електроприводах з перетворювачами частоти на IGBT-транзисторах

Розглянуто переваги транзисторних перетворювачів частоти з широтно-імпульсною модуляцією перед тиристорними. Показано приклади економії електроенергії, води, газу в результаті впровадження регульованих електроприводів, які гарантують строк окупності капітальних вкладень на рівні 3-8 місяців.
регулятор частоти, широтно-імпульсна модуляція, векторне керування, енергозаощадження

Задачі електрозбереження обумовлюють актуальність впровадження регульованих електроприводів (РЕП) перш за все в установках з різко змінним протягом доби навантаженням – водонасосних станціях, системах кондиціонування повітря, компресорних тощо, в яких споживана потужність пов'язана із кутовою швидкістю двигуна кубічною залежністю [1-3].

Використовувані до нині тиристорні перетворювачі частоти (ПЧ) мають ряд значних недоліків, які істотно знижують техніко-економічні показники електроприводу в цілому [4]. До таких недоліків слід віднести перш за все:

1. Комутаційні провали, виникаючі у момент включення вентилів тиристорного випрямляча для отримання необхідної випрямленої напруги в ланці сталого струму.
2. Необхідність застосування для управління основними тиристорами додаткової ємності, індуктивності і тиристора, що викликає невиправдане підвищення додатково розсіюваної потужності і різке зниження ККД та cosφ всього перетворювача.
3. Значна встановлена потужність перетворювача, яка у 2-2,5 рази має перевищувати потужність двигуна, що призводить до завищених масогабаритних показників.
4. Наявність вищих гармонік у вихідній напрузі, зниження яких фільтрами проблематично, а методами широтно–імпульсної модуляції (ШІМ) є неможливим внаслідок низької частоти перемикання тиристорів [5].
5. Нездатність стійкої роботи ПЧ в зоні низьких швидкостей при 0-20 Гц.
6. Неможливість реалізації режиму рекуперативного гальмування.

Тому, для ефективного управління асинхронним електроприводом раціонально використовувати інвертори напруги на IGBT-транзисторах з широтно-імпульсним керуванням робоча частота яких вища за 16 кГц [6].

Повністю керована транзисторна техніка дозволяє радикально вирішувати питання забезпечення якості споживаної енергії згідно ДСТ-13109-97 (виключення споживання реактивної потужності, уникнення генерації гармонік струму і напруги), що приводить до істотного зниження втрат енергії у електротехнічному устаткуванні.

Застосування нових методів контролю і управління з використанням ПЧ на IGBT–транзисторах дозволяє одержати нові різновиди векторного управління до особливостей якого відносяться**:**

© С.В. Серебренніков, О.І. Кондратьев. 2004

1. Точне відпрацювання швидкості з компенсацією ковзання;

2. Збереження величини моменту сталим при малих частотах аж до нульової швидкості;

3. Плавність роботи двигуна і швидка реакція на стрибки навантаження (при різких стрибках навантаження практично не відбувається зміни швидкості унаслідок високої динаміки регулювання);

4. Оптимізація ККД двигуна на низьких частотах за рахунок регулювання струму намагнічування і зниження втрат в міді.

Ефективність застосування частотно-регульованих асинхронних електроприводів на основі IGBT—інверторів з мікропроцесорною системою управління обумовлюється:

1. Енерго- і ресурсозбереженням;

2. Істотним зниженням споживання реактивної потужності з мережі (дослідження показали, що cosφ ≈1 при будь-якому навантаженні).

3. Збільшенням ресурсу роботи електричного, механічного гідравлічного устаткування;

4. Автоматизацією і оптимізацією управління технологічними процесами.

Окрім власне дворівневого перетворення електричної енергії (випрямляння і інвертування), силовий канал вирішує також й наступні задачі:

1. Керованого зв'язку з мережею - оперативні і аварійні включення і виключення електроприводу;

2. Електромагнітної сумісності електроприводу мережею [7];

3. Автоматичного захисту елементів ПЧ і електродвигуна від неприпустимих струмів і напруг;

4. Реалізація гальмівних рекуперативних режимів електроприводу.

Застосування векторного керування ПЧ дозволяє стабілізувати оберти асинхронного двигуна незалежно від навантаження на його валу за рахунок введення від'ємного зворотнього зв'язку, тому раціональні області їх застосування:

- спеціальні верстати й обробні центри з позиціонуванням;
- складні підйомно-транспортні механізми, ліфти;
- електричний транспорт.

Натомість, в електроприводах, які не потребують точної підтримки швидкості при коливаннях навантаження доцільно використовувати більш прості і дешевші ПЧ із скалярним керуванням.

Результати проведених нами досліджень РЕП з ПЧ, встановлених на Переяслав-Хмельницькій підвищувальній насосній станції (ПНС) третього підйому з електродвигуном потужністю 11 кВт, приведені на рисунках 1-3. За рахунок автоматичного підтримування сталого тиску в мережі водогону (крива 2 на рис.2) досягнуто не тільки суттєвої економії електроенергії (рис.3), а й зменшення витрат води (рис.1), обумовлених надмірним тиском (крива 1 на рис.2). Ці досліди доводять, що існуючі до цього часу методи механічного регулювання дроселюванням чи бой пасами є абсолютно неефективними, особливо при низькому водорозборі.

Рисунок 1 – Графік витрат води

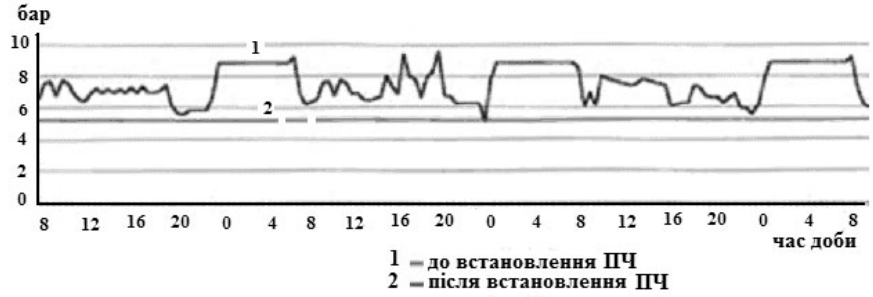


Рисунок 2 – Графік тиску на виході насоса

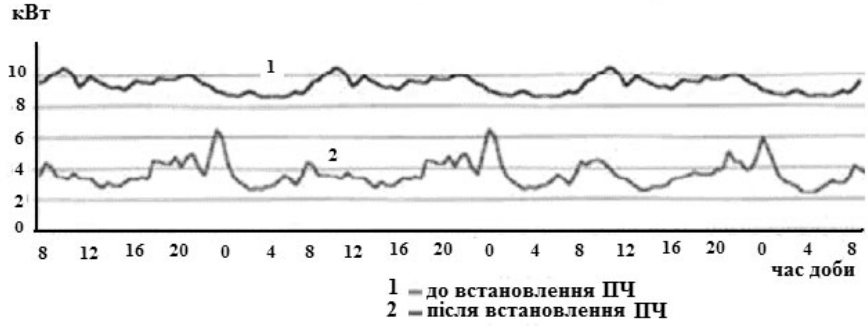


Рисунок 3 – Графік потужності спожитої двигунами насосів

Результати спостережень протягом року за роботою РЕП, встановлених нами в системах водопостачання м. Комсомольська, представлені у табл. 1. Видно, що річна економія становить в середньому 25%.

В табл. 2 наведено дані експериментальних досліджень економії електроенергії та води по трьох групах будинків з ПНС

Таблиця 1 - Витрата води по місяцях, м^3 (2002 р. – без ПЧ, 2003 р. - з ПЧ)

Місяць/ рік	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2002	8150	8300	9200	9980	9500	6710	7320	6500	6480	7050	7600	6790
2003	7600	5700	5200	5910	6610	5260	6438	5620	5910	5280	4920	6160
Економія	540	2600	4000	4070	2890	1450	882	880	570	1770	2680	630
Економія %	7	31	43	41	30	22	11	14	9	25	35	9

Таблиця 2 - Економія електроенергії і води за рахунок застосування керованого електроприводу

Об’єкт	Термін спостереження, міс.	Економія води, $м^3$	Економія води, %	Економія електроенергії, кВт*г	Економія електроенергії, %
Буд. 1	9	173200	25	18820	51
Буд. 2	5	8550	18,6	11200	53
Буд. 3	4	4685	27,5	8970	54

На підприємстві **“**ТЕПЛОКОМУНЕНЕРГО” м. Комсомольськ нами також, був проведений експеримент для оцінки ефективності використовування перетворювачів частоти на теплових станціях для управління приводами димососів і вентиляторів газових котлів. ПЧ встановлено на вентиляторі і димососі водогрійного котла потужністю по 11 і 22 кВт відповідно. Залежно від різних зовнішніх умов (витрати теплоносія, температури повітря, лімітів газу і т. д.) з карти режимів вибирається той або інший режим роботи котла, який визначається витратою газу, що у свою чергу, пов’язане з тиском повітря на вході котла при постійному розрідженні на виході. Тиск створюється за допомогою нагнітаючого вентилятора, а розрядження - за допомогою димососа.

Традиційно для регулювання тиску і розрядження використовуються засувки, так звані шибера, які змінюють продуктивність вентилятора і димососа. При використовуванні РЕП, продуктивність димососа і вентилятора може змінюватися за рахунок зміни швидкості обертання відповідних електродвигунів.

Випробування проводилося у два етапи:

1. Вимірювання витрат електроенергії при роботі з шиберами
2. Вимірювання витрат електроенергії при роботі з перетворювачами частоти.

Витрати електроенергії вимірювалися при наступних витратах газу:

- максимальна витрата (90% завантаження) – 2800 $м^3$/година;
- проміжне значення 1 – 2200 $м^3$/година;
- проміжне значення 2 – 1450 $м^3$/година;
- мінімальна витрата (30% завантаження) – 900 $м^3$/година.

Покази лічильників фіксувалися у “Журналі обліку електроенергії”. Результати експерименту приведені у табл. 3

Таблиця 3 – Витрати електроенергії

Час роботи, год.	Витрата газу, $м^3$/год	Витрати електроенергії, кВт·г		Економія електроенергії
		Шибера	ПЧ	
6	2800	495	140	72%
6	2200	450	80	82%
6	1450	352	20	94%
6	900	315	9,6	97%

Фактична економія у 94-97% виглядає нереальною при правильному проектуванні і нормальному стані устаткування. Отже, після проведення експерименту, стало зрозуміло, що при використовуванні ПЧ в даній системі, можуть застосовуватися

двигуни істотно меншої потужності. Зокрема, у максимальному режимі на частоті 50 Гц вентилятор споживав лише 5,6 кВт замість номінальних 11 кВт.

Слід зауважити, що спорядження ПЧ двигунів на водогрійних котлах викликає певні застереження замовників з огляду на жорсткі вимоги до техніки безпеки у котельнях. Але досвід першого використання РЕП на "ТЕПЛОКОМУНЕНЕРГО" м. Комсомольська засвідчив, що ПЧ фірми „Danfoss", які споряджені гнучкою системою налаштування, суттєво підвищили безпеку експлуатації котлів за рахунок додаткових можливостей захисту двигунів та виключення людського фактору під час розпалювання котла.

З приведених результатів досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Упровадження ПЧ в системі управління на етапі проектування, дозволить оптимізувати склад систем, що приведе до зменшення їх вартості і підвищення енергоефективності.

2. Спорядження діючих електроприводів ПЧ дозволяє отримати значну економію електроенергії, води, газу, яка гарантує строк окупності капіталовкладень на рівні 3 – 8 місяців (залежно від потужності ПЧ)

3. Подальше зниження питомих витрат на одиницю теплової та електроенергії можливе за рахунок упровадження замість водогрійних котлів, що працюють на газі, когенераційних установок, які забезпечать автономну високоефективну роботу котелень

Список літератури

1. Оттерпол Г., Хюбнер Р. Технические и экономические аспекты применения энергосберегающих электроприводов в насосных и вентиляторных механизмах (из опыта фирмы "Elpro AG", Германия) - Научно-технический семинар "Энергосберегающий электропривод насосов и вентиляторов в промышленности и коммунальном хозяйстве", Тезисы докладов, М.,1995.– С.12-16.
2. Браславский И.Я. Современные тенденции применения частотно-регулируемых асинхронных электроприводов для обеспечения производственных требований и энергосбережения // Сборник тезисов докладов "Межрегиональная научно-практическая конференция по применению энергосберегающего частотно-регулируемого электропривода во всех отраслях производства и в коммунальном хозяйстве". Новоуральск. 22-25 января 2002.
3. Поляков В.Н. Теоретические предпосылки к созданию частотно-регулируемого электропривода с энергосберегающими алгоритмами управления // Сборник тезисов докладов "Межрегиональная научно-практическая конференция по применению энергосберегающего частотно-регулируемого электропривода во всех отраслях производства и в коммунальном хозяйстве". Новоуральск. 22-25 января 2002.
4. Глинтерник С.Р. Тиристорные преобразователи со статическими компенсирующими устройствами. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с.
5. Применение LC-фильтра в инверторе напряжения с ШИМ для улучшения формы напряжения и тока инвертора. Use of an LC filter to achieve a motor-friendly performance of the PWM voltage source inverter / Steinke Juergen K. // IEEE Trans. Energy Convers. - 1999. - 14, 3. - С. 649-654.
6. Мануковский Ю. М., Пузаков А. В. Широко регулируемые автономные транзисторные преобразователи частоты. Кишинев: Штиница, 1990. - 152 с.
7. Зиновьев Г.С. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 90 с.

УДК 338.534

Б.С. Серебренніков
Київський національний економічний університет

Маркетингове управління енергоспоживанням на роздрібному ринку електроенергії

Розроблено маркетингову систему диференційованих в часі цін на засадах індивідуального підходу до енергоспоживачів. Економічно обґрунтовано екстремальні значення цін, отримано цінові функції, проведено порівняльні дослідження оплат за діючою 3-ставковою та маркетинговою 24-ставковою системою диференційованих цін залежно від ступеня регулювання попиту на електроенергію.
баланс електроенергії, економічне стимулювання, маркетинг, сегментування, індивідуальні диференційовані в часі ціни, комплексна цінова пропозиція

Однією з необхідних умов нормального функціонування електроенергетики є жорсткий баланс обсягів споживання та генерації енергії в кожний конкретний момент часу. У разі недотримання балансу в енергосистемі виникають серйозні проблеми, як то: погіршення якості енергії, зниження надійності енергопостачання, більш швидкий знос генеруючого та передавального обладнання, зростання технологічних втрат енергії, підвищення її собівартості. Це, в свою чергу, непрямо відбиваються на якості життя та економічному стані споживачів (відключеннями від енергопостачання, більш швидким зносом та псуванням електроприладів і устаткування, подорожчанням виготовлюваної продукції за рахунок зростання витрат на електроенергію) тощо.

Попит на електричну потужність, який виявляють кінцеві споживачі протягом доби, характеризується значною нерівномірністю. Об'єднана енергосистема (ОЕС) України не в змозі повністю задовольнити його в періоди ажіотажного попиту, оскільки існує проблема дефіциту маневрових генеруючих потужностей. Будівництво нових маневрових електростанцій потребує значних матеріальних та часових ресурсів, що обумовлює низьку еластичність пропозиції енергії на ринку, ще більше її знижує неможливість накопичення та зберігання виробленої електроенергії в промислових обсягах.

За останні роки нерівномірність попиту дещо знизилась, проте це пов'язано не стільки з впровадженням диференційованих цін, скільки із змінами в загальній структурі енергоспоживання та адміністративними обмеженнями попиту споживачів [1].Тому задача досягнення балансу споживання електроенергії з її генерацією шляхом вирівнювання в часі графіку попиту на електричну потужність ОЕС України досі залишається найактуальнішою на ринку електроенергії.

Те, що вартість електроенергії для споживачів за останні роки зростає і становить все вагомішу частку у собівартості їхньої продукції є серйозною основою для створення економічних стимулів щодо енергозаощадження.

Зменшити витрати споживачів на електроенергію можна двома основними шляхами:

1. Перейшовши на оплату за диференційованими в часі цінами при відповідному регулюванні режиму енергоспоживання.
2. Знизивши енергоємність технологічних процесів та впроваджуючи енергозберігаючі технології.

Обидва шляхи приносять вигоду як споживачу, так і ОЕС [2]. Попервах представляється раціональним використовувати перший шлях, оскільки він є

© Б.С. Серебренніков. 2004

простішим в реалізації і радикальнішим, причому регулювання шляхом адитивного зсуву графіків електричних навантажень у часі є найбільш прийнятним для споживача, оскільки при цьому передбачається повне збереження обсягів виробництва при незмінному технологічному процесі. Економічно стимулювати споживачів до регулювання графіка навантаження має диференційована цінова політика енергопостачальних компаній (ЕК).

На сьогодні електроенергія використовується практично в усіх сферах людської діяльності і, таким чином, продається на всіх видах ринків – промисловому, споживчому, некомерційних організацій, державних установ тощо. Роздрібний ринок електроенергії (РРЕ) характеризується значною неоднорідністю споживачів, які з точки зору ЕК відрізняються за категорією безперебійності живлення, за класом напруги, за режимом споживання енергії, за економічним станом, юридичним статусом тощо. В цих умовах стратегія однакового, індиферентного підходу до споживачів [3, 4] є малоефективною, оскільки не враховує їх індивідуальні особливості при розробці та впровадженні диференційованих в часі цін.

Метою статті є розробка маркетингових диференційованих в часі цінових систем на принципах індивідуального підходу та гнучкості ціноутворення для економічного стимулювання споживачів до адекватного управління власними режимами енергоспоживання, впровадження енергозбереження і підвищення ефективності роботи ОЕС України.

Зважаючи на неоднорідність споживачів електроенергії, специфіку процесу енергоспоживання, складність економічних взаємовідносин між споживачами та ЕК, розробку та реалізацію маркетингової цінової політики доцільно здійснювати на засадах: 1) диференційованого підходу до споживачів; 2) гнучкості цінової політики [5]. Платформою для ефективного впровадження цих принципів є маркетингове сегментування РРЕ.

Наразі оплата електроенергії за диференційованими в часі цінами здійснюється з використанням шести часових зон та трьох відповідних ставок ціни. Для стимулювання переведення споживачів на роботу в нічному режимі національна комісія по регулюванню електроенергетики (НКРЕ) у 2004 р. встановила такі коефіцієнти до основної ціни:

- нічний (з 23:00 до 6:00) – 0,25;
- піковий період (з 8:00 до 10:00, з 17:00 до 20:00) – 1,8;
- напівпіковий період (6:00 до 8:00, з 10:00 до 17:00, з 20:00 до 23:00) – 1,02.

Діюча система диференційованих цін розроблена для всього роздрібного енергоринку в цілому (крім населення). Існуюче зонування попиту на електроенергію в ОЕС, яке покладено в основу диференціювання роздрібних цін протягом доби, з маркетингвої точки зору характеризується такими недоліками:

1) неадекватність дискретизації попиту на енергію в ОЕС по відношенню до попиту окремих енергоспоживачів;

2) відсутність гнучкості в зонуванні попиту;

3) нестабільність тривалості часових зон та їх розподілу в часі, що ускладнює процеси планування господарської діяльності для споживачів;

4) невідповідність диференціації роздрібних цін, здійсненої оптовим енергоринком, графікам попиту окремих споживачів.

Для забезпечення адекватного відображення характеру енергоспоживання протягом доби і підвищення гнучкості управління енергопопитом, ми вважаємо за необхідне наряду з 1- та 3-ставковими ціновими системами розробити і задіяти маркетингові важелі керування енергоспоживанням, основою для яких є збільшення кількості цінових зон до 24-48 [6]. Таке рішення гармонійно поєднується з технічними

аспектами енергоспоживання, оскільки облік спожитої електроенергії провадиться підприємствами із інтервалом 30 хвилин, у результаті чого графік електричних навантажень набуває ступінчастого вигляду.

Першим етапом розробки індивідуальної цінової системи для споживачів є розрахунок максимальної ($Ц_{MAX}$) та мінімальної ($Ц_{MIN}$) цін протягом доби. Максимальну ціну доцільно розраховувати на основі результатів досліджень техніко-економічних показників діяльності окремих енергоспоживачів з умови їх беззбитковості:

$$Ц_{MAX} = \frac{П + B_{E.C}}{V_E}, \quad (1)$$

де $П$ – прибуток енергоспоживача від реалізації власної продукції;

$B_{E.C}$ – сумарні витрати споживача на оплату електроенергії до переходу на диференційовані ціни;

V_E – загальний обсяг споживання електроенергії конкретним споживачем.

При використанні енергії в даній ціновій зоні споживач не отримуватиме прибутку. Розрахунок верхньої межі цін за формулою (1) дозволить економічно стимулювати споживача до перенесення енергоспоживання в менш навантажені зони, для яких встановлені менші значення цін, і, відповідно, забезпечить вигоду у вигляді скорочення витрат на оплату електроенергії.

Мінімальне значення ціни, згідно умови симетричності зміни цін відносно $Ц_{СЕР}$ [7], має розраховуватись за формулою:

$$Ц_{MIN} = 2 \cdot Ц_{СЕР} - Ц_{MAX}. \quad (2)$$

Якщо дані про прибуток енергоспоживачів є важкодоступними, тоді слід застосовувати підхід, заснований на оцінці техніко-технологічних можливостей окремих споживачів до управління власним попитом на енергію в часі.

Для них доцільно використовувати показник λ, що є пропорційним відносній потенціальній економії енергії в піковій зоні за рахунок відповідного регулювання режиму електроспоживання [8]:

$$\lambda = \Delta V_{MAX} / V_{MAX}, \quad (3)$$

де ΔV_{MAX} – потенціальне зменшення енергоспоживання в піковій зоні за рахунок енергозбереження або перерозподілу навантажень до менш навантаженої зони;

V_{MAX} – початковий обсяг енергоспоживання в піковій зоні.

Для створення у споживача високої заінтересованості у регулюванні режимів енергоспоживання доцільно, аби економічний ефект, отриманий ним за рахунок скорочення витрат на електроенергію при переході на диференційовані ціни, був сумірним з прибутком споживача від реалізації продукції, а діапазон диференціювання ціни був пропорційним показнику λ: $Ц_{MAX} - Ц_{MIN} = F(\lambda)$.

Тоді, екстремальні значення ціни для конкретних споживачів мають розраховуватись із співвідношень:

$$\begin{aligned} Ц_{MAX} &= Ц_{СЕР}(1 + \lambda), \\ Ц_{MIN} &= Ц_{СЕР}(1 - \lambda), \end{aligned} \quad (4)$$

де $Ц_{СЕР}$ – середнє значення ціни для споживача, визначеної ЕК, до переходу на оплату за диференційованими в часі цінами.

При цьому, автоматично виконуються обов'язкова умова щодо симетричної відносно $Ц_{СЕР}$ синхронної зміни $Ц_{MAX}$, $Ц_{MIN}$ при $\lambda = var$, тобто:

$$[Ц_{MAX}(\lambda) + Ц_{MIN}(\lambda)]/2 = Ц_{CEP} = \text{const}, \quad (5)$$

Після встановлення індивідуальних меж добових цін необхідно визначити характер зміни ціни в цих межах через функцію ціни, залежну від коливань попиту (відхилень значення попиту споживача в і-й ціновій зоні (ΔPi) від середнього значення попиту протягом доби): $Цi = F(\Delta Pi)$. Вид функцій має визначатись індивідуально для кожного окремого споживача.

З цією метою необхідно застосовувати функції, що відповідають наступним загальним умовам:

а) непарність та центральносиметричність;

б) стимулювання споживача до адекватного регулювання попиту;

в) зрозумілість та простота реалізації.

У найбільшій степені цим вимогам відповідають лінійна та непарні степеневі функції [7].

Головною умовою переходу споживачів на диференційовані в часі ціни передбачається збереження обсягів виробництва і незмінність технологічного процесу, з регулюванням енергоспоживання шляхом адитивного зміщення його в часі.

Для підвищення ефективності комерційної діяльності ЕК варто формувати комплексну маркетингову цінову пропозицію, під якою розуміється розробка та реалізація проекту переходу певного споживача на розрахунок за диференційованими цінами згідно принципу "під ключ". Запропонований підхід полягає в наступному:

1. Аналіз енергоспоживача: добових графіків попиту на електроенергію, здатності до їх регулювання, технічних та економічних показників діяльності.

2. Формування індивідуальної, адаптованої до результатів п.1, системи диференційованих у часі цін.

3. Техніко-економічне обґрунтування переходу споживача на оплату електроенергії за диференційованими цінами.

4. Аналіз реакції споживача та корегування неузгоджених елементів комплексної маркетингової цінової пропозиції ЕК.

5. Комерційна та технічна реалізація проекту переходу споживача на оплату електроенергії за диференційованими цінами.

Розглянемо більш детально алгоритм формування комплексної маркетингової пропозиції ЕК.

На початку енергопостачальним компаніям необхідно проаналізувати добові графіки енергоспоживання головних підприємств-споживачів на предмет доцільності і можливості їх регулювання.

Залежно від характеру типового графіку попиту споживача на електроенергію протягом доби формується індивідуальна диференційована цінова шкала підбором відповідної цінової функції.

Визначення потенційної економії коштів від переходу на оплату електроенергії за диференційованими цінами доцільно здійснювати у певному діапазоні - залежно від ступеня регулювання підприємством власного енергоспоживання в часі. Фактично такі дії є підготовчим етапом формування комплексної цінової пропозиції щодо переходу підприємства на оплату електроенергії за диференційованими цінами, оскільки створюються економічні передумови для зацікавлення споживачів.

У разі, якщо споживач погоджується на подальшу роботу в напрямку зміни цінової системи, енергопостачальним компаніям слід сформувати комплексну маркетингову цінову пропозицію, включаючи такі елементи:

1) спектр варіантів економії витрат на оплату електроенергію при використанні діючої та маркетингової систем диференційованих цін;

2) характеристику кожного з варіантів економії відповідно до зміни режиму енергоспоживання;

3) інвестиції для впровадження цінової системи;

4) прогноз періоду часу на впровадження та окупність нової системи диференційованих цін та підтримки її технічної реалізації.

Для реалізації перших двох елементів нами розроблено алгоритм і відповідна програма для ЕОМ. Передбачений розрахунок і порівняння трьох варіантів оплат: за діючими 1- і 3-ставковими цінами та пропонованою індивідуальною 24-48 ставковою ціною. Для кожного варіанту розраховується оплата С при реалізації адитивного зсуву графіка P(t) споживача відносно графіка ЕК у діапазоні Δt=0...24 год з побудовою залежності С(Δt) і визначенням умов мінімізації оплати.

Проілюструємо метод маркетингового регулювання енергоспоживання на прикладі ВАТ "Гідросила", середньодобовий графік зимових навантажень якого показаний на рис.1, а відповідний графік сумарного попиту ЕК "Кіровоградобленерго" – на рис.2.

Реалізація лінійної цінової функції

$$\frac{Ц_i}{Ц_{СЕР}} = 4{,}8305\left(\frac{P_i^{ЕК} - P_{СЕР}^{ЕК}}{P_{СЕР}^{ЕК}}\right) + 1 \qquad (6)$$

(де $P_i^{ЕК}, P_{СЕР}^{ЕК}$ - відповідно поточне та середнє значення потужності ЕК) з розподілом цін по 24-х зонах доби згідно рис.2, економічно стимулює споживачів до регулювання енергоспоживання таким чином, аби перемістити графік $P(t)$ із зони максимального навантаження ЕК (а відповідно високих цін) при t=7...22 год до зони з меншими цінами при t=22...7 год (рис.2).

При $Ц_{СЕР}$ = 32 коп /кВт·год з умови (1) визначено $Ц_{МАХ}$ / $Ц_{СЕР}$ = 1,9688 і за формулою (2) $Ц_{MIN}$ / $Ц_{СЕР}$ = 0,0312.

Результати розрахунку оплати за 24-ставковою ціною

$$C_1(\Delta t) = \sum_{i=1}^{24} \frac{P_i^{ПС}}{P_{МАХ}^{ПС}} \cdot t_i \cdot \frac{Ц_i}{Ц_{СЕР}} \qquad (7)$$

при погодинному зсуві графіків $P(t)$ показані на рис.3 (крива 1); для порівняння там же зображено графік оплати за електроенергію W_i за 3-ставковою ціною:

$$C_3(\Delta t) = 0{,}25 \cdot W_1 + 1{,}02 \cdot W_2 + 1{,}8 \cdot W_3 . \qquad (8)$$

Аналіз графіків показує, що криві оплат C_1, C_3 мають екстремальний характер, причому C_1 = min при Δt = 11 год, а C_3 = min при Δt = 9 год. Споживач отримуватиме економію від переходу з одноставкової на диференційовані ціни при зміщеннях в діапазоні Δt = 3...18 год, причому в області Δt = 9,1...20 год $C_1(\Delta t) < C_3(\Delta t)$. Слід зазначити, що режим енергоспоживання, який відповідає C = min є найбільш бажаним для ОЕС і найбільш привабливим з економічної точки зору для споживача.

Графік різниці в оплатах (C_1 - C_3), що показаний на рис.4, наочно демонструє конкретному споживачеві економічні вигоди від переходу на ту чи іншу систему оплати при відповідному ступені регулюванні режиму енергоспоживання. З рис.3, 4 видно. що мінімальної оплати "Гідросила" досягне при переході на 24-ставкову систему диференційованих цін і зміщенні графіка $P(t)$ на Δt = 11 год.

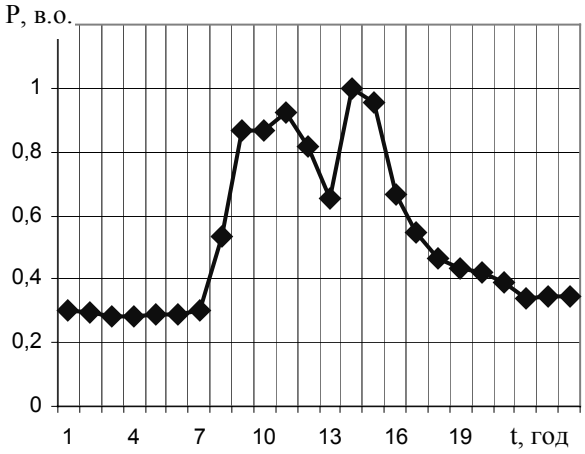


Рисунок 1 – Добовий графік зимового навантаження ВАТ “Гідросила”

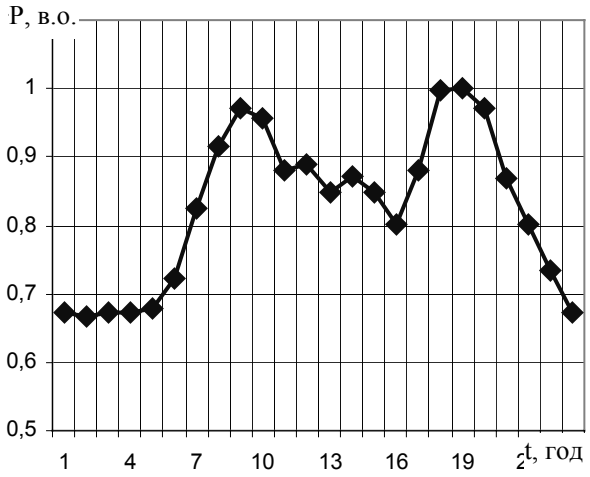
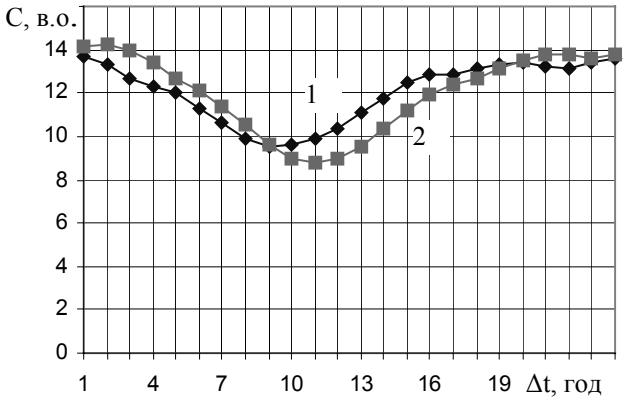


Рисунок 2 – Добовий графік зимового навантаження ВАТ “Кіровоградобленерго”



1 – 3-ставкова ціна; 2 – 24 – ставкова ціна
Рисунок 3 – Динаміка оплати за електро-енергію при лінійній ціновій функції

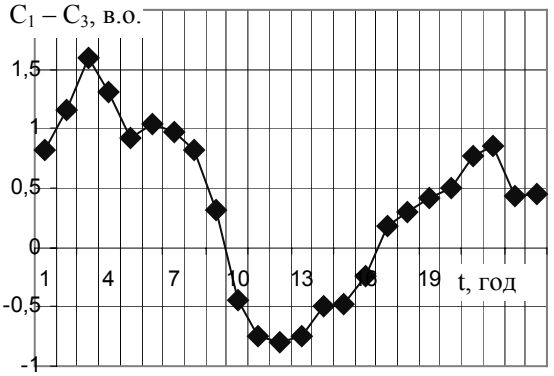
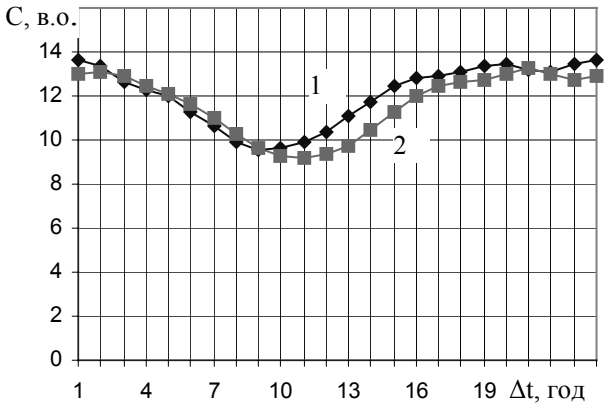


Рисунок 4 – Співвідношення оплат за 24 – та 3 – ставковою ціною (при лінійній ціновій функції)



1 – 3-ставкова ціна; 2 – 24 – ставкова ціна
Рисунок 5 – Динаміка оплати за електро-енергію при кубічній ціновій функції

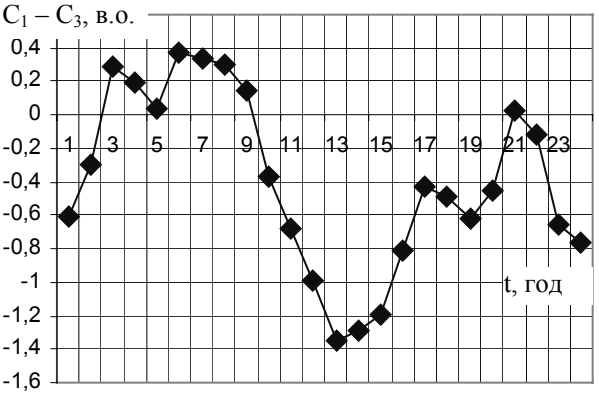


Рисунок 6 – Співвідношення оплат за 24 – та 3 – ставковою ціною (при кубічній ціновій функції)

Створення цінових шкал з прогресуючим кроком $\Delta Ц$ [7] дозволяє посилити стимулювання споживача до зменшення перш за все пікових навантажень $P_{MAX}(t)$.

Результати використання кубічної цінової функції з прогресуючим $\Delta Ц$

$$\frac{Ц_i}{Ц_{CEP}} = 119{,}3\left(\frac{P_i^{EK} - P_{CEP}^{EK}}{P_{CEP}^{EK}}\right)^3 + 1 \qquad (9)$$

показані на рис.5. Видно, що при цьому нівелюється вплив малих відхилень P_i від P_{CEP} на фоні відносного збільшення внеску $P_{MAX}(t)$. Внаслідок цього, часова зона, де $C_1(\Delta t) < C_3(\Delta t)$ суттєво розширилась до Δt = 9,2...2,5 год. Відповідно змінився і характери графіка (C_1 – C_3) на рис.6, тобто, маркетингова система цін в більшому ступені стимулює споживача до регулювання попиту.

Аналогічні дослідження, проведені для інших споживачів ЕК (ВАТ “Червона Зірка”, “Хлібозавод”, “Швейна фабрика” тощо), які відрізняються характером енергоспоживання, дозволили виявити для них умови максимальної зацікавленості у регулюванні власного попиту на електроенергію.

Природно, що на другому етапі регулювання, коли підприємство буде оснащено апаратурою погодинного обліку електроенергії, воно самостійно шукатиме більш глибинні способи мінімізації оплати, пов’язані з енергозбереженням і оптимізацією технологічного процесу.

Імплементація маркетингових підходів до встановлення диференційованих цін дозволить більш адекватно стимулювати окремих споживачів до управління власними режимами енергоспоживання і енергозбереження через використання індивідуальних цінових систем, комплексної підтримки по їх впровадженню, а також сприятиме підвищенню ефективності взаємодії всіх ланок енергосистеми: генеруючих компаній, оптового ринку електроенергії, енергопостачальників та споживачів.

Список літератури

1. Находов В.Ф., Замулко А.І. Роздрібні тарифи на електричну енергії в умовах енергоринку України // Энергетика и электрификация. – 2002. – №4. – С. 22 – 27.
2. Дерзкий В.Г., Трафимов В.В. Планирование дифференцированных по зонам суток тарифов на электроэнергию в объединенной энергосистеме // Энергетика и электрификация. – 1994. - №3. – С. 36 – 39.
3. Находов В.Ф., Замулко А.И., Федоренко Л.Н. Тарифы на электрическую энергию управления энергоснабжением-энергопотреблением в рыночных условиях // Энергетика и электрификация. – 1998. – №2-3. – С. 46 – 48.
4. Праховник А.В., Находов В.Ф. Концепция создания многофункциональной системы розничных тарифов на электроэнергию // Энергетика и электрификация. – 1996. – №1. – С. 40 – 42.
5. Герасимчук В.И., Серебренников Б.С. Методы ценообразования на рынке электроэнергии. //Международна научна конференция "Унитех’03", 20 – 21 ноември 2003, Габрово: Сборник доклади. Том II. – Габрово: Университетско издательство "Васил Априлов", 2003. – С. 90 – 93.
6. Серебренніков Б.С. Цінове управління попитом на електроенергію роздрібних споживачів // Економіка та підприємництво: Зб. наук. праць молодих учених та аспірантів. Вип. 11. / Відп. ред. С.І. Дем’яненко. – К.: КНЕУ, 2003. – С. 186 – 195.
7. Серебренніков Б.С. Маркетингове регулювання динамічності диференційованих цін на електроенергію // Формування ринкової економіки: Зб. наук. праць. Спец. вип. Сучасні проблеми теорії і практики маркетингу. – К.: КНЕУ, 2004. – С. 382 – 391.
8. Серебренніков Б.С. Сегментування роздрібного ринку електроенергії // Наукові праці ДНТУ. Серія: Економічна. Вип. 68. – Донецьк: ДНТУ, 2003. – С. 76 – 82

УДК 621.31

П.Г. Плєшков, Л.Г. Віхрова, доценти, канд. техн. наук, О.І. Сіріков
Кіровоградський національний технічний університет

Імовірносна оцінка вузлової несиметрії струмів в електричних мережах

Стаття присвячена питанню імовірнісної оцінки вузлової несиметрії струмів. При її математичному моделюванні вважалося що струм у фазі підкорений нормальному закону розподілу, а струми у фазах не залежні. За результатами моделювання була визначена імовірність появи несиметрії у вузлі яка при прийнятій точності вимірювальних приладів 2 % дорівнює майже одиниці (p=0,995). На її основі визначена імовірності існування несиметрії струмів протягом деякого часу за добу яка при обчисленій імовірності появи склала найімовірніше (P=0,786) всю добу. Це свідчить про те що практично весь час електричні мережі з великою кількістю однофазних споживачів працюють в несиметричному режимі.

несиметрія струмів, нормальний закон розподілу, імовірність появи несиметрії, імовірність існування несиметрії протягом доби

Як показано в [2,3,4] струм у фазах підкорений нормальному закону розподілу тому його можна моделювати безперервною випадковою величиною – струмом *I*. Якщо в мережі що досліджується переважають однофазні електроприймачі (комунально-побутові мережі), то допустимо вважати що струми у фазах *A, B, C* незалежні. При моделюванні будемо вважати що математичне очікування і середньо квадратичне відхилення для кожної фази однакові тобто:

$$m_A = m_B = m_C = m, \quad \sigma_A = \sigma_B = \sigma_C = \sigma \tag{1}$$

такий випадок можливий лише при точному розподілені однофазних електроприймачів між фазами.

В подальшому при вирішенні поставленої задачі будемо оперувати методами математичної статистики, використання якої дає можливість провести загальний аналіз, опираючись на мінімальний об'єм експериментальних даних. Відомо [1], що розсіяння нормального розподілення випадкової величини з точністю до частин відсотка укладається на ділянки $m\pm3\sigma$ (правило „трьох сигм"). Ця обставина дозволяє, знаючи практичний діапазон зміни випадкової величини, наближено оцінити параметри закону її розподілу. Згідно цього правила можна записати

$$m_A = m_B = m_C = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \tag{2}$$

$$\sigma_A = \sigma_B = \sigma_C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{6} \tag{3}$$

де $I_{\max}$, $I_{\min}$ – відповідно найбільше і найменше значення струму в фазі.

Спочатку знайдемо максимальну імовірність *P(C)* появи в вузлі симетричного навантаження при умові (1), а потім знайдемо мінімальну імовірність *P(H)* амплітудної струмової несиметрії як різницю

$$P(H) = 1 - P(C) \tag{4}$$

Позначимо через *D* складну подію, яка полягає в тому, що в вузлі мережі що досліджується фазні струми співпадають по величині, тобто

© П.Г. Плєшков, Л.Г. Віхрова, О.І. Сіріков. 2004

$$D = \begin{Bmatrix} I_A = I \\ I_B = I \\ I_C = I \end{Bmatrix} \tag{5}$$

де $I \in (I_{\max} : I_{\min})$.

Оскільки випадкові величини I_A, I_B і I_C безперервні, до імовірність кожної із подій $I_A = I_B = I_C = I_j$, де I_j – одно з можливих значень стуму I, дорівнюють імовірності попадання в „точку" тобто нулю [1]. Тому, використовуючи загальноприйнятий прийом, визначимо імовірність попадання випадкової величини не в „точку", а в деяку задану область $I_j \pm \delta$. Очевидно, що δ грає роль точності, з якою визначається поняття рівності фазних струмів.

Імовірність простої події *P(j)* – попадання випадкової величини струму фази в задану *j* –ту область дорівнює

$$P(j) = P(I_j + \delta \geq I \geq I_j - \delta) = \Phi^*\left(\frac{I_j + \delta - m}{\sigma}\right) - \Phi^*\left(\frac{I_j - \delta - m}{\sigma}\right)$$

де $\Phi^*\left(\frac{I-m}{\sigma}\right)$ – нормальна функція розподілу [1].

Тоді з урахуванням (1) імовірність складної події D_j – попадання трьох незалежних випадкових величин в *j* –й інтервал визначається наступним чином:

$$P(D_j) = \prod_j^3 \left[P(j)\right] = \left[\Phi^*\left(\frac{I_j + \delta - m}{\sigma}\right) - \Phi^*\left(\frac{I_j - \delta - m}{\sigma}\right)\right]^3 \tag{6}$$

Для обчислення імовірності *P(C)* появи в вузлі симетричного навантаження з використанням (6) діапазон можливих змін випадкової величини I_j необхідно розбити на *n* однакових областей шириною 2δ кожна. Тоді згідно теорії складання імовірностей незалежних подій

$$P(C) = \sum_j^n \left[P(D_j)\right] \tag{7}$$

Використовуючи властивість симетрії кривої нормального розподілу, вираз (7) можливо перетворити до вигляду

$$P(C) = 2\sum_j^{n/2} \left[P(D_j)\right] \tag{8}$$

Як видно із (8), кількість областей n зручно вибрати парним, а ширину кожної кратній величині середньо квадратичного відхилення σ.

Точність, з якою повинна визначатися множина однакових струмових навантажень фаз, не повинна перевищувати величину точності вимірювальних приладів. Наприклад, для струмових кліщів, які в основному використовуються для оперативного вимірювання струму в розподільчих мережах 0,4 кВ похибка вимірювання приладу складає 2,0 %, тобто межі ±2 %. Межі точності які були взяті в [2] ±8,3 % (тобто попадання струму на інтервал 16,6 % по фазам вважається як симетричний режим) значно завищені.

Значення δ можна знайти за виразом

$$\delta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2n} \tag{9}$$

Звідки знайдемо значення *n* при $\delta = 2$ %.

$$n = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2\delta} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 * 0.02} = 25(I_{\max} - I_{\min}) \quad (10)$$

Враховуючи що *n* повинно бути парним приймаємо *n*=26 (Рис. 1).

Тоді середньоквадратичне відхилення буде дорівнювати

$$\sigma = \frac{26}{3}\delta \quad (11)$$

Виконавши вказане розбиття на інтервали (Рис. 1), підрахуємо імовірність $P(D_j)$ одночасного знаходження трьох фазних струмів спочатку в 14-му, потім в 15-му і т. д. до 26-ї ділянки, після чого визначимо імовірність *P(C)* за (8). З урахуванням (11) маємо при *j*=14 і $I = m + \delta$

$$P(D_{14}) = \left[\Phi * \left(\frac{m + \delta + \delta - m}{\frac{26}{3}\delta} \right) - \Phi * \left(\frac{m + \delta - \delta - m}{\frac{26}{3}\delta} \right) \right]^3 = 0{,}0007599$$

Розрахунки для інших ділянок подібні результати розрахунку зведені до Табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахунок значень імовірності одночасного знаходження трьох фазних струмів на *j*-тих ділянках

j	$P(D_j)$	j	$P(D_j)$
14	0,0007599	21	0,0000088
15	0,0006481	22	0,0000025
16	0,0004715	23	0,0000006
17	0,0002926	24	0,0000001
18	0,0001549	25	0
19	0,0000699	26	0
20	0,0000269	Всього	0,0024358

Тоді *P(C)* визначимо за (8)

$$P(C) = 2\sum_{j}^{n/2}\left[P(D_j)\right] = 2 \cdot 0{,}0024358 = 0{,}0048716$$

Тоді при умові (1) і прийнятому $\delta = 2$ % мінімальна імовірність несиметрії струмів в вузлі згідно (4) складе

$$P(H) = 1 - 0{,}0048716 = 0{,}9951284 \approx 0{,}995$$

На основі вище наведеного можливо зробити висновок про те що імовірність несиметрії у вузлі маже дорівнює одиниці, тобто існування симетричного режиму з точки зору теорії імовірності практично не можлива подія.

Знаючи значення імовірності появи несиметрії можливо знайти імовірність її існування деякий час протягом доби. Для вирішення цієї задачі скористаємось формулою повторення дослідів [1], де під імовірністю $P_{m,h}$ буде розумітися імовірність існування несиметричного режиму протягом *m* часових інтервалів із *h* на які розбита доба. Імовірність $P_{m,h}$ знаходиться за формулою

$$P_{m,h} = C_h^m p^m q^{h-m} \quad (12)$$

де $C_h^m = \frac{h!}{m!(h-m)!}$ – кількість всіх можливих комбінацій *m* із *h*;

p – імовірність появи несиметрії на кожному інтервалі;

q – імовірність появи симетрії на кожному інтервалі $q = 1 - p$.

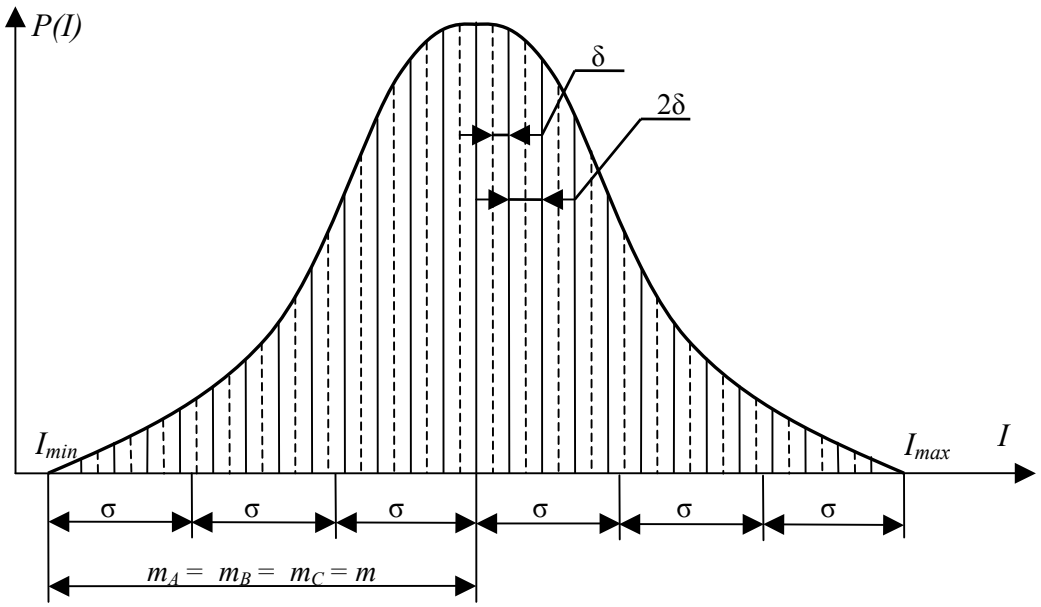


Рисунок 1 – Поділ нормальної функції розподілу на інтервали

Інтервали на які необхідно розбити добу дорівнюють 30 хв. (інтервал осереднення добового графіка), тобто h =48.

Визначимо за (12) імовірність того що несиметричний режим буде існувати спочатку протягом одного, потім двох, потім трьох і т. д. інтервалів.

$$P_{1,48} = C_{48}^{1} 0{,}995^{1} 0{,}005^{48-1} = 3{,}39 \cdot 10^{-107}$$

Розрахунок для іншої кількості інтервалів подібний, результати розрахунку зведені до табл. 2

Таблиця 2 – Розрахунок імовірності існування несиметрії на m часових інтервалах протягом доби при імовірності появи несиметрії p=0,995

m	C_h^m	$P_{m,h}$	m	C_h^m	$P_{m,h}$	m	C_h^m	$P_{m,h}$
1	48	3,39E-107	17	4,24E+12	1,82E-59	33	1,09E+12	2,83E-23
2	1128	1,59E-103	18	7,31E+12	6,22E-57	34	4,82E+11	2,48E-21
3	17296	4,84E-100	19	1,15E+13	1,95E-54	35	1,93E+11	1,98E-19
4	194580	1,08E-96	20	1,67E+13	5,64E-52	36	6,97E+10	1,42E-17
5	1712304	1,90E-93	21	2,23E+13	1,50E-49	37	2,26E+10	9,17E-16
6	12271512	2,71E-90	22	2,74E+13	3,65E-47	38	6,54E+09	5,28E-14
7	73629072	3,23E-87	23	3,1E+13	8,22E-45	39	1,68E+09	2,69E-12
8	3,77E+08	3,30E-84	24	3,22E+13	1,70E-42	40	3,77E+08	1,21E-10
9	1,68E+09	2,92E-81	25	3,1E+13	3,26E-40	41	73629072	4,68E-09
10	6,54E+09	2,26E-78	26	2,74E+13	5,73E-38	42	12271512	1,55E-07
11	2,26E+10	1,56E-75	27	2,23E+13	9,29E-36	43	1712304	4,31E-06
12	6,97E+10	9,55E-73	28	1,67E+13	1,39E-33	44	194580	9,75E-05
13	1,93E+11	5,26E-70	29	1,15E+13	1,90E-31	45	17296	1,73E-03
14	4,82E+11	2,62E-67	30	7,31E+12	2,40E-29	46	1128	2,24E-02
15	1,09E+12	1,18E-64	31	4,24E+12	2,77E-27	47	48	1,90E-01
16	2,25E+12	4,85E-62	32	2,25E+12	2,93E-25	48	1	7,86E-01

Аналогічним чином можна розрахувати імовірність існування несиметрії протягом деякого часу за добу при іншій імовірності її появи p. Наприклад, для імовірності яка розрахована в [2] (p=0,916) результати розрахунку наведені в Табл. 3.

По Табл. 2 і 3 побудовані графіки залежності імовірності існування несиметрії від кількості часових інтервалів – Графік 1 при p=0,995 і Графік 2 при p=0,916.

Із графіків 1 і 2, а також Табл. 2 і 3 видно що при імовірності появи несимерії p=0,995 найімовірнішою кількістю часових інтервалів існування несиметрії є 48 т. б. уся доба, а при p=0,916 – 44 т. б. 22 год. на добу.

Таблиця 3 – Розрахунок імовірність існування несиметрії на m часових інтервалах протягом доби при імовірності появи несиметрії p=0,916

m	C_h^m	$P_{m,h}$	m	C_h^m	$P_{m,h}$	m	C_h^m	$P_{m,h}$
1	48	1,21E-49	17	4,24442E+12	4,29E-22	33	1,09326E+12	4,42E-06
2	1128	3,11E-47	18	7,30984E+12	8,06E-21	34	4,82321E+11	2,13E-05
3	17296	5,20E-45	19	1,15418E+13	1,39E-19	35	1,92928E+11	9,28E-05
4	194580	6,38E-43	20	1,67357E+13	2,19E-18	36	69668534468	3,65E-04
5	1712304	6,12E-41	21	2,23142E+13	3,19E-17	37	22595200368	1,29E-03
6	12271512	4,79E-39	22	2,73857E+13	4,27E-16	38	6540715896	4,08E-03
7	73629072	3,13E-37	23	3,09577E+13	5,26E-15	39	1677106640	1,14E-02
8	3,77E+08	1,75E-35	24	3,22476E+13	5,98E-14	40	377348994	2,80E-02
9	1,68E+09	8,48E-34	25	3,09577E+13	6,26E-13	41	73629072	5,95E-02
10	6,54E+09	3,61E-32	26	2,73857E+13	6,04E-12	42	12271512	1,08E-01
11	2,26E+10	1,36E-30	27	2,23142E+13	5,37E-11	43	1712304	1,65E-01
12	6,97E+10	4,57E-29	28	1,67357E+13	4,39E-10	44	194580	2,04E-01
13	1,93E+11	1,38E-27	29	1,15418E+13	3,30E-09	45	17296	1,98E-01
14	4,82E+11	3,76E-26	30	7,30984E+12	2,28E-08	46	1128	1,41E-01
15	1,09E+12	9,30E-25	31	4,24442E+12	1,44E-07	47	48	6,53E-02
16	2,25E+12	2,09E-23	32	2,25485E+12	8,36E-07	48	1	1,48E-02

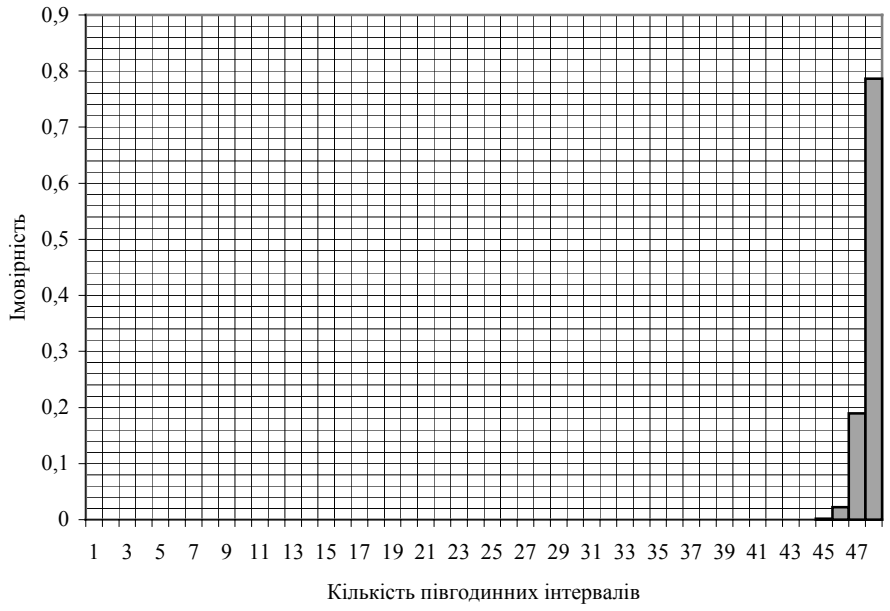


Рисунок 2 – Графік залежності імовірності існування несиметрії від кількості часових інтервалів при p=0,995

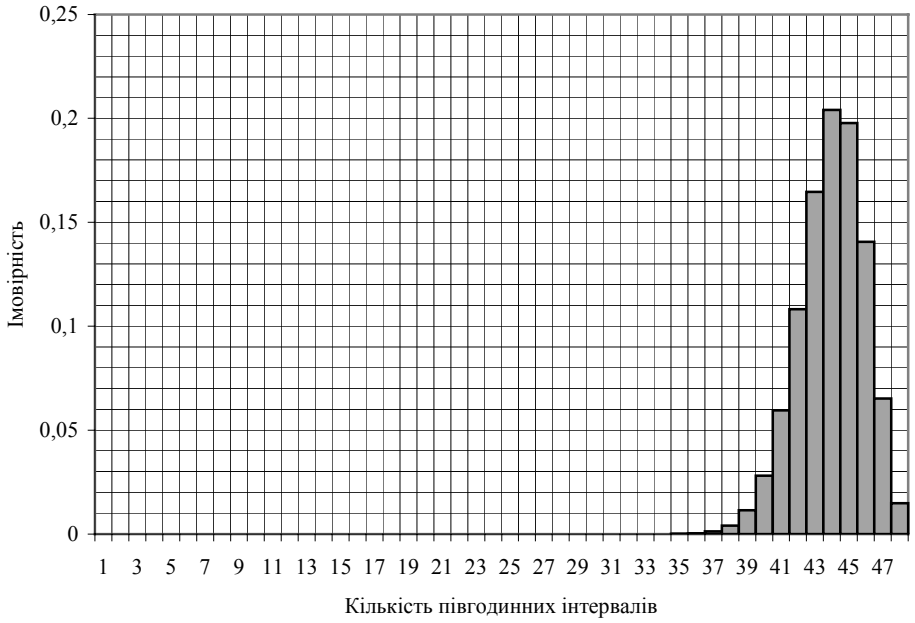


Рисунок 3 – Графік залежності імовірності існування несиметрії від кількості часових інтервалів при p=0,916

На основі вище викладеного можна зробити висновок про те, що імовірність появи амплітудної струмової несиметрії в довільно вибраному вузлі з великою кількістю однофазних споживачів дорівнює p=0,995, на основі графіків залежності імовірності існування несиметрії від кількості часових інтервалів, що найімовірніше всю добу буде спостерігатися струмова несиметрія, т. б. електричні мережі всю добу працюють в несиметричному режимі. Отриманий результат ще раз свідчить о змістовності задачі дослідження і оптимізації несиметричних режимів електричних мереж.

Список літератури

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М. «Наука», 1969. – 576 с.
2. Колесниченко А. Б. Оптимизация режимов распределительных электрических сетей с несимметричными нагрузками: Дис. канд. тех. наук. 05.14.02. – К., 1992. – 274 с.
3. Мирошник А. В. Определение дополнительных потерь электроэнергии в сельских электрических сетях 0,38/0,22 кВ при неравномерной нагрузке фаз: Дис. канд. тех. наук. 05.09.03. – М., 1985. – 278 с.
4. Тульчин И. К. Нудпер Г. И. Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий. – М. Энергоатомиздат, 1990. – 480 с.

УДК 621.313

А.П. Черный, доц., канд. техн. наук
Кременчугский государственный политехнический университет

Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии

В статье рассмотрены вопросы работоспособности асинхронных двигателей при старении изоляции всыпных обмоток и подшипниковых узлов при уровне эксплуатационных воздействий соответствующих номинальным условиям эксплуатации и несимметрии двигателя вызванной длительной эксплуатацией или последствиями ремонтных операций. Сделана оценка вероятности безотказной работы.
работоспособность, надежность, долговечность работы, подшипники, изоляция, вибрация, качество преобразования энергии

Введение

Качество электрических машин представляет совокупность свойств определяющих их пригодность для эксплуатации. Надежность является важнейшим технико-экономическим показателем качества любого технического устройства, в частности электрической машины, определяющим ее способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации.

Проблема надежности электрических машин за последнее десятилетие резко обострилась, что объясняется следующими объективными причинами. С одной стороны увеличением сложности технических систем и экстремальностью условий их эксплуатации, интенсивностью и повышением требований к качеству работы систем. С другой стороны, и по нашему мнению, это является в настоящее время превалирующим, сокращение выпуска электрических машин приводит к необходимости эксплуатировать машины, которые длительное время находятся в эксплуатации или подвергались ремонтам различной степени сложности. Установленным является факт, что ремонтировавшиеся электрические машины имеют характеристики которые отличаются от проектных [1,2]. Ни типовые, ни контрольные испытания электрических машин не дают достаточных сведений об их надежности, для определения которой требуются специальные испытания. Каждый из параметров контрольных испытаний в известной мере характеризует состояние определенного участка технологического процесса [6,7]. Ток холостого хода АД, например, зависит от величины воздушного зазора между статором и ротором. Потери холостого хода связаны с качеством штамповки и сборки листовой стали, а после ремонта от состояния пакета: закороченных или распушенных листов, наличия грата или механических повреждений. Сопротивление статора характеризует качество намотки, натяжение обмоточного провода, колебания его диаметра. Сопротивление ротора зависит от качества заливки ротора и т.п.

В этой связи важной научно-технической проблемой является повышение надежности электрических машин, установление их состояния и ресурса работоспособности [3].

Вопросам прогноза ресурса работоспособности посвящено очень большое

© А.П. Черный. 2004

количество работ. В большинстве случаев используется модель «слабейшего звена», т.е. вероятность безотказной работы системы определяется с учетом числа ее элементов, для которых в свою очередь предлагаются модели надежности [4,5] на основе распределения Вейбулла, экспоненциальных или полученных экспериментальным путем интерполяционных полиномов. Такие модели легли в основу многих отраслевых стандартов, например [5]. Основным недостатком разработанных моделей является то, что с одной стороны методики нахождения эмпирических коэффициентов не учитывают состояние машины после ремонта и количество ремонтов, а с другой стороны – предназначены для медленно изменяющихся характеристик и протекания процессов старения, износа, продавливания, разрушения адгезионных связей и т.п. Использование таких моделей требует обширного статистического материала, расчетных заводских параметров принятых при проектировании машины, а также точных паспортных данных. Здесь мы приходим к неразрешимой, с использованием современных теорий, задаче: с одной стороны от ремонта к ремонту паспортные данные и характеристики изменяются, а с другой стороны – это не позволяет проводить правильный статистический анализ.

Анализ проблемы поиска путей оценки состояния и определения ресурса работоспособности электрических машин указывает на существование взаимосвязей между качеством преобразования энергии, работоспособностью изоляции, подшипников и долговечности электрической машины, которые можно представить следующей алгоритмической зависимостью [8]:

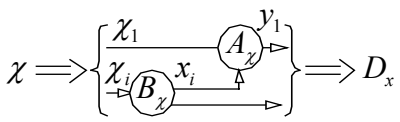


Рисунок 1 – Структура взаимосвязей показателей определяющих работоспособность электрического двигателя

На рис.1 - χ – обобщенный показатель некачественности преобразования энергии; A_χ – проектная работоспособность изоляции; B_χ – проектное значение параметра вибраций; x_i – воздействие механических факторов на работоспособность изоляции; D_χ – фактическая работоспособность электрического двигателя.

Из приведенной схемы видно, что на основании показателей качества преобразования энергии и, особенно, их составляющих, существует возможность определения технико-экономических показателей электрических машин и электротехнических установок и комплексов, реализовать мероприятия по эффективному использованию оборудования, а также выполнить оценку его работоспособности и прогноз надежности работы [8,9].

К таким показателям можно отнести следующие коэффициенты [11]:

- коэффициент энергетических потерь или коэффициент эффективности использования потребляемой энергии, который существу этот показатель является коэффициентом полезного действия и характеризует машину в целом и по фазно;
- коэффициент императивных потерь, определяющий отношение греющих изоляцию потерь к общим потерям мощности;
- коэффициенты неравномерности токовой загрузки фаз и неравномерности тепловыделения в обмотках.

Указанные критерии отражают качественную сторону процесса преобразования энергии. Они позволяют судить о эффективности преобразования электрической энергии в двигателе. Ниже приведены критерии, имеющие прямое отношение к

надежности привода и прогнозированию срока его эксплуатации [11]:

– коэффициент некачественности преобразования момента (отношение среднего момента к среднеквадратичному):

$$K_{нп\ м} = 1 - \frac{M_0}{M_д}$$

где M_0 - постоянная составляющая электромагнитного момента; среднеквадратичный момент с периодом питающего напряжения T, c :

$$M_д = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left(M_0 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n \, sin(n\omega t + \varphi_n) \right)^2 dt} = \sqrt{M_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n^2} \; ;$$

– коэффициент некачественности преобразования, отражающий ухудшение вибрационных характеристик электрической машины:

$$K_{нпв} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} M_n^2}}{\sqrt{M_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} M_n^2}} \; ;$$

– коэффициент увеличения нагрузки за счет переменной составляющей момента:

$$k_m = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T M(t)^2 dt}}{\frac{1}{T}\int_0^T M(t) dt} \; ; \qquad (1)$$

– Показатель электромагнитной несимметрии, которая может быть учтена анализом параметра взаимной индуктивности x_μ, которая характеризует зазор. При $x_{\mu A} \neq x_{\mu B} \neq x_{\mu C}$ - существует конструктивная несимметрия:

$$x_{\mu ср} = \frac{1}{3} \sum_{i}^{A,B,C} x_{\mu i} \; , \qquad (2)$$

где пофазные $\Delta x_{\mu i} = \frac{x_{\mu i} - x_{\mu ср}}{x_{\mu ср}} 100\%$ отклонения;

– показатель, учитывающий нелинейные свойства элементов;
– показатель, определяющий неравномерность распределения потерь в стали;
– показатель, характеризующий несимметрию магнитной системы машины и др.

Цель работы

Целью работы является определение снижения ресурса работы электрических машин на основе показателей качества преобразования энергии.

Материал и результаты исследований

В промышленных условиях надежность работы электрических машин выполняется на основе испытательных операция. Однако ни типовые, ни контрольные испытания электрических машин не дают достаточных сведений об их надежности, для определения которой требуются специальные испытания. Количественные показатели надежности электрических машин могут быть получены только для определенных условий эксплуатации. При этом факторы, от которых зависит надежность, тоже должны быть выражены в виде количественных показателей.

Оценивать количественно следует и физические свойства применяемых материалов (особенно изоляции), и их изменения в эксплуатационных условиях. Прогнозирование надежности электрических машин основывается, следовательно, на количественном анализе изменения свойств материалов и конструкций под действием внешних и внутренних разрушающих факторов. Во многих случаях эти изменения могут быть представлены в виде зависимостей не только статистического, но и функционального характера.

Рассматривая вопросы старения и износа изоляции необходимо сказать, что возможны повреждения изоляции не связанные с износом: продавливание, прорезание ее острыми кромками металлических деталей, образование трещин вследствие напряжений при изгибе и т.п. Такие местные дефекты часто развиваются сравнительно быстро и приводят к пробою изоляции задолго до существенного ухудшения ее свойств во всем объеме вследствие электрического или термоокислительного разрушения.

Изоляция пазовой части обмотки испытывает сжатие под действием электродинамических сил, при наличии зазоров в пазу она также подвержена ударам и истиранию о стенки паза. Если свобода перемещения отсутствует, то в изоляции кроме растяжения и сжатия возможно появление деформации сдвига. При изгибе лобовых частей обмотки наибольшие напряжения возникают в местах выхода стержней или катушек из пазов, где изоляция испытывает напряжения сжатия и растяжения. Кроме того, она сминается на прокладках и местах соприкосновения с бандажами. В большинстве случаев перечисленные усилия имеют циклический характер, причем характерной является вибрация с частотой 100 Гц.

Действие вибрации – вибрационное старение – на всыпные обмотки выражается в постепенном разрушении пропиточного лака, в результате чего нарушается цементация обмотки и отдельные проводники приобретают некоторую свободу перемещения. Это ведет к разрушению витковой изоляции в точках соприкосновения соседних проводников. В результате увеличивается вероятность витковых замыканий, которые являются основной причиной отказов всыпных обмоток. Замечено [5], что старение изоляции низковольтных машин, работающих при умеренных температурах обмоток, вообще не может быть объяснено с позиций электрических или тепловых явлений. В этих случаях наиболее существенными причинами, вызывающими постепенное разрушение изоляции, являются механические нагрузки.

Анализ вибрационного старения можно попытаться рассмотреть, используя уравнение Ходвинка для скорости продавливания пленки [4]:

$$\frac{dh}{dt} = F_1 \psi h^{F_2} \frac{k_f^n}{\Theta_0^{F_3}}, \qquad (3)$$

где h - двухсторонняя толщина изоляции провода;

ψ - коэффициент текучести полимерного изоляционного материала;

Θ - площадь сопротивления проводников;

n - параметр, зависящий от температуры;

F_1, F_2, F_3 - функции от n;

k_f - усилие, действующее в месте контакта проводников.

Время, за которое происходит полное продавливание, или долговечность, ч:

$$\tau = \frac{F_1}{\psi k_f^n}. \qquad (4)$$

С учетом (1) выражение (4) запишем в виде:

$$\tau = \frac{F_1}{\psi\left(k_m k_f\right)^n}, \tag{5}$$

из которого может быть получен коэффициент снижения долговечности k_τ, графическая зависимость которого приведена на рис 2.

Для большинства электрических машин подшипники представляют собой второй по значению (после обмотки) источник отказов. Ненормальная работа подшипников сопровождается чрезмерным увеличением температуры, шумом, утечками смазки, повышенным сопротивлением при вращении и увеличении момента трогания механизма. Причины тому могут быть разнообразными, но более 80% подшипников качения выходит из строя вследствие разрушений усталостного характера.

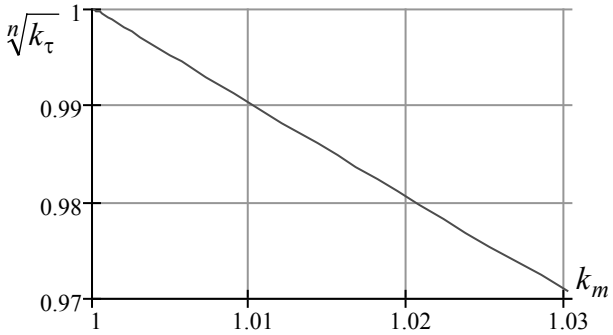


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента снижения долговечности изоляции от увеличения нагрузки от переменной составляющей момента

Подшипники качения весьма чувствительны к перегрузкам. Известно [5], что при увеличении нагрузки на подшипник вдвое его долговечность уменьшается, примерно, в 10 раз.

При расчете подшипников качения определяют их типоразмеры при заданных сроке службы, нагрузке и частоте вращения. Наибольшая радиальная нагрузка (Н) на подшипник [10]

$$R = \left(G + T_0\right)\frac{b}{l} + F_n k_0, \tag{6}$$

где G - сила тяжести сердечника ротора с обоймой и участком вала по длине сердечника, Н;

T_0 - сила одноосного магнитного тяжения, Н;

F_n - поперечная сила от передачи, Н;

k_0 - коэффициент, зависящий от подшипника ($k_0 = \frac{1}{l}\left(l + c\right)$ - для подшипника выступающего конца вала,

$k_0 = \frac{c}{l}$ - для подшипника, установленного с противоположной стороны вала);

b - расстояние от точки приложения сил тяжести и одноосного магнитного тяжения до опоры выступающего конца вала;

l - расстояние между опорами;

c - расстояние от опоры выступающего конца вала до точки приложения силы F_n.

Величины G, T_0 и F_n определяются геометрическими размерами, но

$$F_n = \left(\frac{k_n M_н}{r} \right) 10^3, \tag{7}$$

где k_n - коэффициент, зависящий от вида механической передачи;

r - радиус окружности расположения пальцев упругой муфты или окружности шкива, мм;

$M_н$ - номинальный момент вращения машины, Нм.

Значение R используется при определении приведенной динамической нагрузки на подшипник, например для однорядного радиального шарикоподшипника [4]:

$$Q = k_\sigma f\left(R, A, Y, C_0\right), \tag{8}$$

где A - аксиальная нагрузка, Н;

Y - коэффициент приведения аксиальной нагрузки к радиальной, Н;

C_0 - статическая грузоподъемность, Н;

k_σ - коэффициент, учитывающий характер нагрузки (при режиме работы с умеренными толчками и кратковременной перегрузкой до 150% от номинальной нагрузки $k_\sigma = 1.5$).

Учитывая указанные выражения (1), можно утверждать, что $Q = f\left(M_н\right)$ или при наличии переменной составляющей примет вид $Q' = k_m f\left(M_н\right)$. Тогда долговечность подшипника может быть рассчитана по выражению [5]:

$$nT_{pm} = \left(\frac{C}{k_m Q'} \right)^k, \tag{9}$$

где n - скорость вращения, об/мин;

C - коэффициент работоспособности; $k = 3.33$.

С учетом расчетного срока службы $T_{pm.n}$ (обычно принимают 12000 ч):

$k_t = \dfrac{1}{nT_{pm.n}} \left(\dfrac{C}{Q'} \right)^k$ - коэффициент снижения долговечности подшипника.

На рис.3 Показано значение коэффициента k_t полученные для режима работы двигателя с номинальной нагрузкой и переменной составляющей с амплитудой до 30% номинальной. В табл.1 приведены количественные показатели снижения работоспособности рассчитанные для допустимых уровней несимметрии для асинхронного двигателя 4А132М4, каталожные данные которого приведены в табл. 2.

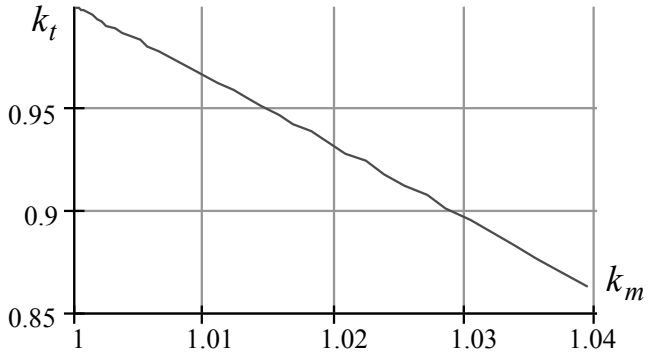


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента снижения долговечности подшипника от увеличения нагрузки от переменной составляющей момента

Таблица 1 - Показатели снижения долговечности и вероятности безотказной работы

Номер кривой	Вид несимметрии	Приведенная переменная составляющая момента, %	k_t	$\sqrt[n]{k_\tau}$
1.	Параметры симметричны	-	1	1
2.	Несинусоидальность напряжения 8%	4.14	0.998	0.999
3.	Несинусоидальность напряжения 12%	6.21	0.996	0.999
4.	Несимметрия взаимных индуктивностей 1.5%	10,8	0,99	0,99
5.	Несимметрия напряжения 2%	14,1	0,98	0,99
6.	Несимметрия напряжения 4%	21.2	0,96	0,98
7.	Несимметрия индуктивностей статора 3%	32,1	0,91	0,97

Полученные значения коэффициенты дают возможность уточнить время работы изоляции и подшипниковых узлов, но для создания эффективных методов обеспечения заданной надежности АД в период эксплуатации необходимо иметь информацию о численных показателях времени и вероятности безотказной работы для возможных условий эксплуатации.

Результирующая вероятность безотказной работы АД [4]:

$$P(t_p) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \qquad (10)$$

где $P_1(t)$ - вероятности отказов, вызванных дефектообразованием и старением изоляции всыпных обмоток,

$P_2(t)$ - производственными дефектами, износом и старением механических частей,

$P_3(t)$ - быстрым тепловым разрушением изоляции обмоток и других элементов конструкции в результате аварийной ситуации.

Таблица 1 - Каталожные данные АД

Номинальная мощность, кВт	11
Номинальное напряжение, В	380
Номинальный ток, А	21,53
Число пар полюсов	4
Номинальное скольжение	0,027
Номинальный коэффициент мощности	0,876
Кратность максимального момента	3,32
Кратность пускового тока	6,83

Анализ законов распределения вероятностей отказов позволил получить зависимость, связывающую среднюю наработку на отказ $T_{ср}$ с основными эксплуатационными факторами: температурой обмотки статора θ °С; частотой пусков ν, ч$^{-1}$; вибрационной скоростью υ, мм/с [12]:

$$T_{ср} = e^{\left(k + 0.135\theta - 0.00064\theta^2 - 0.001\nu - 0.0000247\nu\theta - 0.00000033\upsilon\theta^2 - 0.00081\upsilon^2\right)}. \qquad (11)$$

Принимая номинальными значения θ, ν и увеличение υ от коэффициента k_m, рассчитанное с использованием зависимостей [13,14], можно корректировать величину T_{cp}. Тогда, принимая экспоненциальный закон распределения, можно рассчитать вероятность безотказной работы $P(t_p)$ (рис.4).

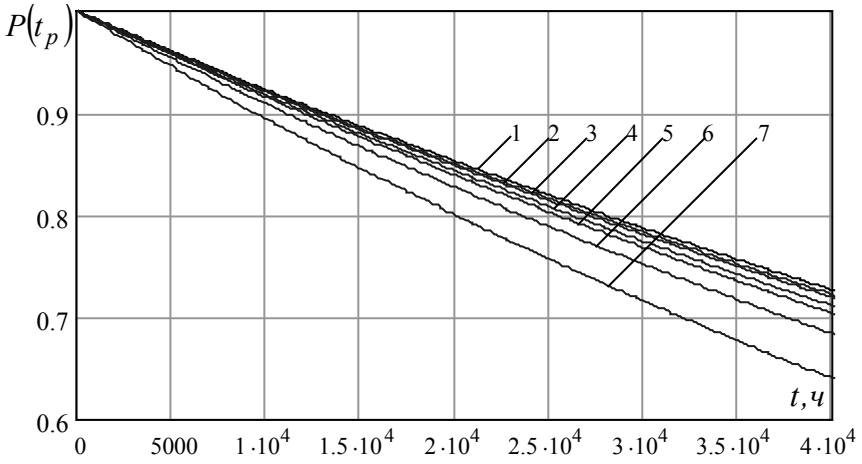


Рисунок 4 – Кривые вероятности безотказной работы асинхронных двигателей

Рассмотренные показатели снижения ресурса работы АД не охватывают всех факторов влияющих на работоспособность. Авторы намеренно не затронули вопросы связанные с влиянием температуры на долговечность изоляции. Эти вопросы достаточно хорошо исследованы и освещены в технической литературе. Дальнейшее развитие работы может быть направлено на исследование влияния неравномерности нагрева обмотки статора АД с увеличением неравномерности воздушного зазора. В месте минимального зазора возникает повышенный перегрев подклиновой зоны обмотки статора, что приводит к ускоренному старению ее изоляции. Данная неравномерность может быть учтена при помощи предложенных коэффициентов качества преобразования энергии, например, (2).

Сформулированные показатели некачественности преобразования энергии расширяют возможности выявления потенциальных (скрытых) дефектов, приобретенных в ходе эксплуатации, предремонтной диагностики или непосредственно ремонта.

Полученные выражения могут быть положены в основу системы оценки состояния электрической машины и системы электропривода, оценки вероятности безотказной работы, выработки рекомендаций по ее эксплуатации в части вывода в ремонт или создания щадящих режимов работы, что позволит существенно увеличить ресурс электрической машины.

Список литературы

1. Родькин Д.И., Черный А.П. К определению послеремонтной работоспособности асинхронных двигателей. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету : Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2001. – Вип. 2(11). – С.40-47.
2. Родькин Д.И., Здор И.Е., Прус В.В., Определение послеремонтной паспортной мощности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, труды КГПИ "Проблемы создания новых машин и технологий", 2000г., выпуск 1, с 162-165.
3. Про затвердження Порядку проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки. Постанова Кабінету міністрів України №687 від 26.05.2004р.

4. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
5. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1976.-248с.
6. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – 4-е изд., сокр. и пераб. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 408 с.
7. Коварский Е. М., Янко Ю. И. Испытание электрических машин. -М.: Энергоатомиздат, 1990. – 317 с.
8. Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах. //Проблемы создания новых машин и технологий. Сб. научных трудов КГПУ: Вып.1. - Кременчуг, 2002. С.81-85.
9. Черный А.П. Показатели качества преобразования энергии при энергомониторинге электромеханического оборудования. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ.- Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип.2(19), Т1. –С.149-151.
10. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. М.:1984. – 428с.
11. К вопросу оценки качества преобразования энергии электромеханическим оборудованием систем электропривода. Черный А.П., Сычев С.Д. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: Вісник Національно технічного університету. “Харківський політехнічний університет”. Харків: ХДПУ, 2003.
12. Любалин В.Э. Исследование зависимости показателей надежности асинхронных двигателей от основных эксплуатационных факторов//Сб. Тр. ВЗПИ, вып. 129, сер. Электрические машины. М.,1981, с. 58-60.
13. Черный А.П., Морозов А.А., Гераскин С.А., Кучеренко В.Ю. К анализу вибрационных характеристик электрических машин с послеремонтными локальными зонами повреждения магнитной системы. «Проблемы создания новых машин и технологий»: Научные труды КГПИ, 2001. Вып.1 (10). – С.259-261.
14. Черный А.П., Морозов А.А., Гераскин С.А. Комплексность задачи определения работоспособности промышленного электромеханического оборудования. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет». Вип. 11. – Харків: ХДПУ, 2001. – С.127-132.

УДК 621.313.04

П.Г. Плєшков, доц., канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет
О.В. Комнатний
ВАТ "Кіровоградобленерго"

Прогнозування графіків навантаження побутових споживачів сільськогосподарських районів

У статті описано методику прогнозування графіків навантаження побутових споживачів сільськогосподарських районів з використанням нейронних мереж та типових графіків навантаження на основі експериментальних даних про щомісячне споживання.
прогнозування, побутові споживачі, нейронна мережа, графік навантаження, річне споживання

Останнім часом при прогнозуванні графіків навантажень більша частина уваги приділяється побудові оперативних прогнозів графіків навантаження енергосистеми. В той же час прогнозуванню графіків навантаження побутових споживачів сільськогосподарських районів увага майже не приділяється, хоч на сьогоднішній день прогнозування електроспоживання побутових споживачів є дуже гострою проблемою.

Графіки електричних навантажень в розрахунках використовують для визначення параметрів електрообладнання, для визначення втрат електричної енергії та для визначення графіка роботи компенсуючих пристроїв. Методи визначення цих параметрів можна розбити на три групи:

1) методи визначення перспективного розрахункового навантаження за довідниковими даними;
2) методи визначення та прогнозування перспективних графіків навантаження на основі експериментальних даних;
3) комбіновані методи, що використовують як довідникові, так і експериментальні дані.

Визначення перспективного розрахункового навантаження за довідниковими даними не є прийнятним, оскільки не враховує існуючу динаміку зміни споживання, яка визначається загальними міграційними процесами, змінами розташування виробництва і т.і. Метод не дає можливості визначення графіка навантажень споживачів, який є необхідним при визначенні параметрів компенсуючих пристроїв та для правильного вибору параметрів силового електрообладнання.

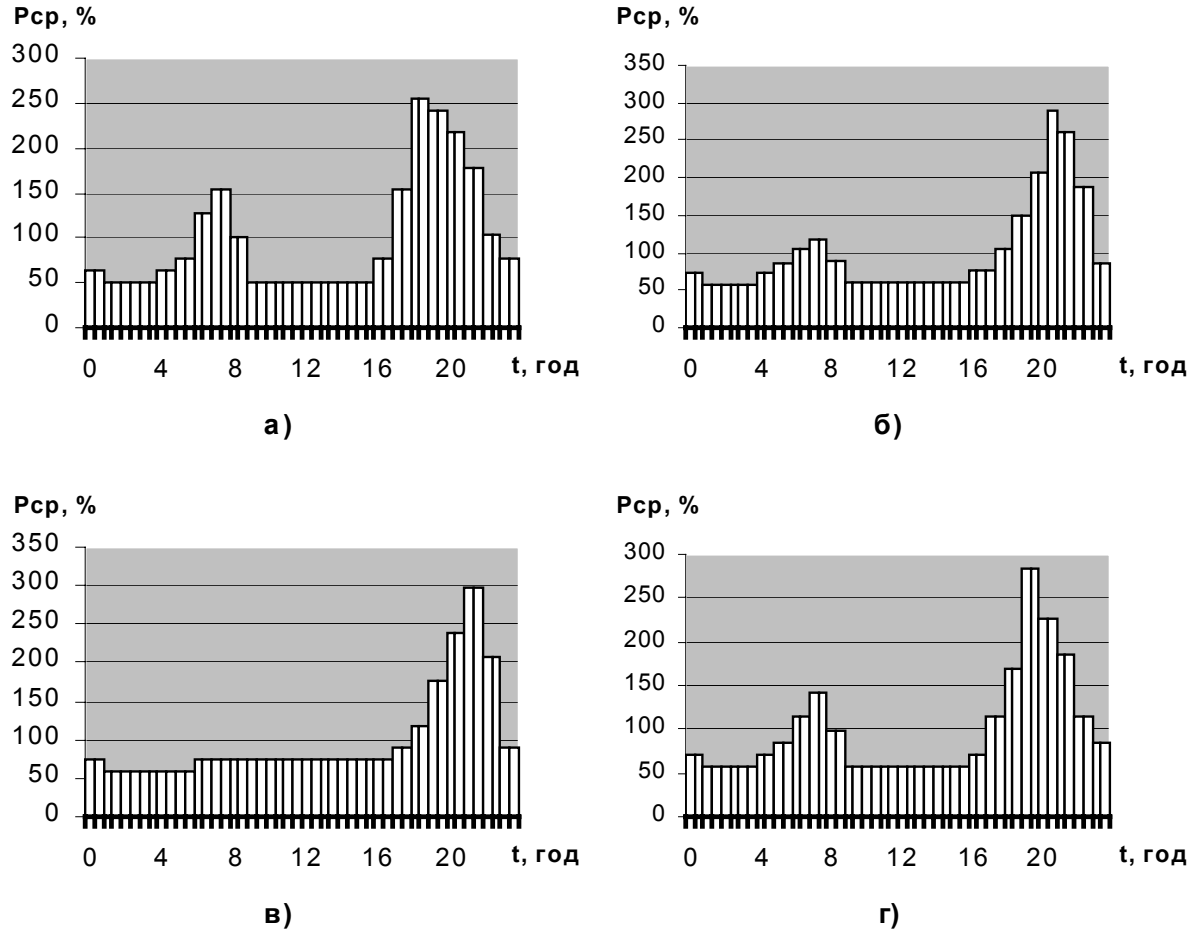
Метод визначення та прогнозування перспективних графіків навантаження на основі експериментальних даних є найбільш точним. Але потребує надто великих затрат для визначення графіків навантаження у великої кількості абонентів за тривалий період.

Найбільш перспективними є комбіновані методи, оскільки вони дозволяють визначити перспективні графіки навантаження споживачів на основі реальної динаміки електроспоживання і в той же час звести до мінімуму затрати на визначення експериментальних даних. Тому було поставлено розробити методику визначення перспективних графіків навантаження для побутових споживачів сільськогосподарських районів на основі комбінованого методу.

Розглянемо проблему прогнозування графіків навантаження з точки зору її інформаційної забезпеченості. Як показав аналіз наявної документації по Петровській філії ВАТ "Кіровоградобленерго" єдиними достовірними даними про навантаження

© П.Г. Плєшков, О.В. Комнатний. 2004

побутових споживачів є їх помісячне споживання на протязі року. Тому в розрахунковій моделі приймаємо, що помісячне споживання на протязі року буде визначатись на основі експериментальних даних, а добові графіки будуть моделюватись на основі типових графіків навантажень побутових споживачів [1, 2].



а) за весняний день; б) за літній день; в) за осінній день; г) за зимовий день

Рисунок 1 - Графіки активного навантаження комунально-побутових споживачів

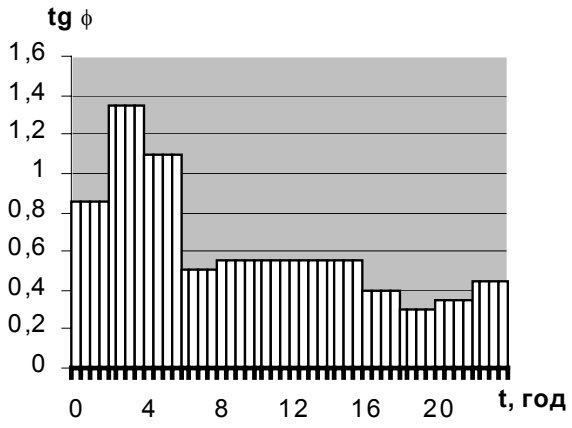


Рисунок 2 - Графік реактивного навантаження комунально-побутових споживачів

Приймаємо до використання графіки навантаження для комунально-побутових споживачів колгоспів, зображені на Рисунку 1 та графік реактивного навантаження ТП 10(6)/0,38 кВ, що живить район з газовими плитами в житлових будинках, зображений на Рисунку 2.

Побудуємо модель експериментального визначення помісячного споживання. Як показує аналіз, проведений по Петровській філії ВАТ “Кіровоградобленерго”, на експериментальні дані діє велика кількість імовірнісних факторів, які на досить короткому проміжку визначеної історії електроспоживання при невеликій кількості споживачів, що живляться від трансформаторної підстанції, не дають можливості побудувати математичну залежність електроспоживання від номера року та номера місяця всередині року. Приклади таких графіків навантаження по деяких підстанціях Петровської філії ВАТ "Кіровоградобленерго" приведено на Рисунку 3.

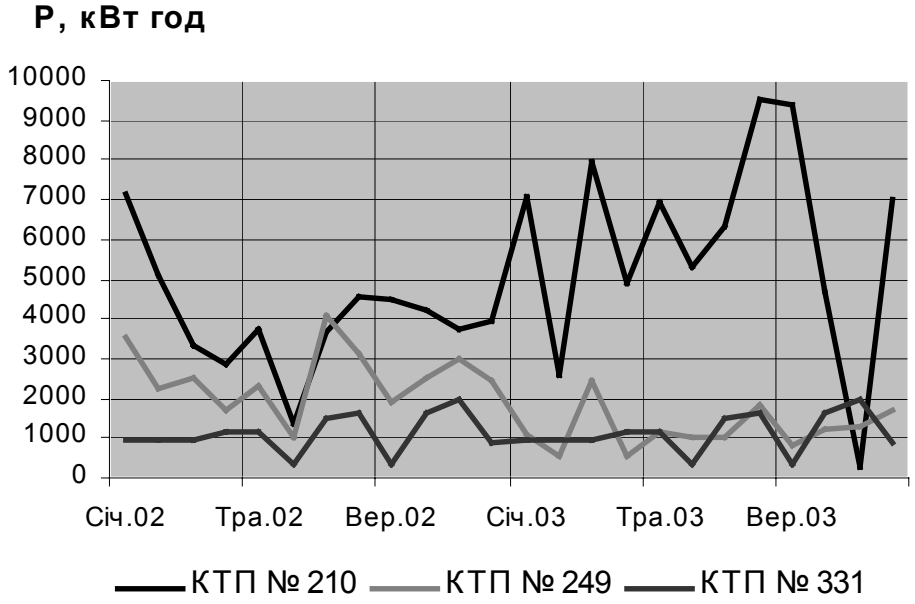


Рисунок 3 - Графіки навантаження КТП 10(6)/0,38 кВ за експериментальними даними

Найбільш суттєвими факторами, що викликають нестабільність електроспоживання, є:

1) нарахування та знімання субсидій побутовим споживачам;
2) заниження показників лічильників при оплаті електроенергії та ліквідація недоплат в наступні періоди;
3) оплата споживачем ще не спожитої електроенергії для зменшення суми платежів в наступні періоди;
4) розкрадання електричної енергії споживачами та її донарахування внаслідок складання Акту про порушення Правил користування електричною енергією.

Розглянемо графік сумарного електроспоживання побутових споживачів по Петровській філії ВАТ "Кіровоградобленерго", зображений на Рисунку 4.

Як видно з графіка, завдяки збільшенню кількості побутових споживачів, електроспоживання яких використовується для побудови графіка, відбувається вирівнювання графіка навантаження. В літні місяці споживання побутових споживачів зменшується, а в зимові – зростає. В той же час графік все ще містить невеликі викиди та провали. Враховуючи те, що технологічні операції, для яких використовується електрична енергія побутовими споживачами є майже однаковими можна вважати ці нерівності графіка випадковими помилковими значеннями.

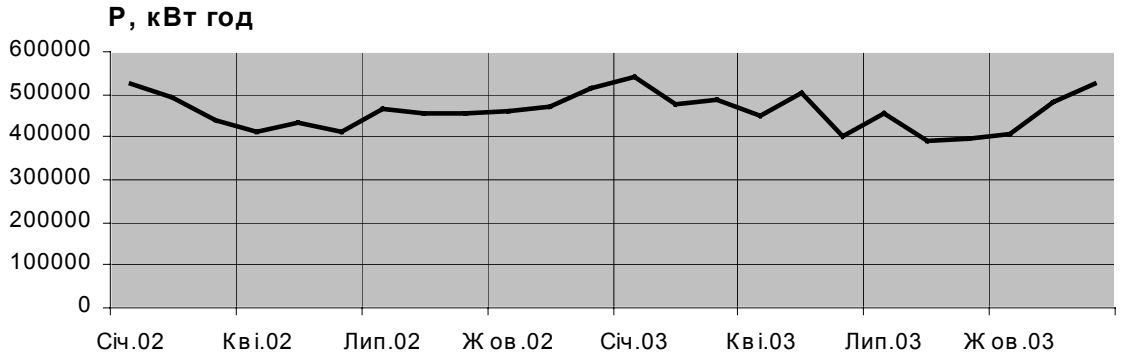


Рисунок 4 - Графік навантаження побутових споживачів Петровської філії ВАТ "Кіровоградобленерго" за експериментальними даними

Як вказано в [3], у випадку задання залежності y(x) значеннями y для рівновіддалених значень x та наявності в значень y випадкових відхилень, по ряду y, використовуючи усереднення на основі інтерполяційних формул, можна уточнити значення ординат, тобто провести згладжування залежності y(x). Для функцій y(x), що суттєво відрізняються від лінійних, використовують нелінійне згладжування з допомогою поліномів високих степеней. Застосуємо для згладжування графіка навантаження поліном третьої степені, який проводить згладжування по семи ординатах. При цьому згладжування даних проводиться за формулами [3]:

$$
\begin{aligned}
\tilde{y}_0 &= \left(39y_0 + 8y_1 - 4y_2 - 4y_3 + y_4 + 4y_5 - 2y_6\right)/42 \\
\tilde{y}_1 &= \left(8y_0 + 19y_1 + 16y_2 + 6y_3 - 4y_4 - 7y_5 + 4y_6\right)/42 \\
\tilde{y}_2 &= \left(-4y_0 + 16y_1 + 19y_2 + 12y_3 + 2y_4 - 4y_5 + y_6\right)/42 \\
\tilde{y}_i &= \left(-4y_{i-3} + 6y_{i-2} + 12y_{i-1} + 14y_i + 12y_{i+1} + 6y_{i+2} - 4y_{i+3}\right)/42 \\
\tilde{y}_{n-2} &= \left(y_{n-6} - 4y_{n-5} + 2y_{n-4} + 12y_{n-3} + 19y_{n-2} + 16y_{n-1} - 4y_n\right)/42 \\
\tilde{y}_{n-1} &= \left(4y_{n-6} - 7y_{n-5} - 4y_{n-4} + 6y_{n-3} + 16y_{n-2} + 19y_{n-1} + 8y_n\right)/42 \\
\tilde{y}_n &= \left(-2y_{n-6} + 4y_{n-5} + y_{n-4} - 4y_{n-3} - 4y_{n-2} + 8y_{n-1} + 39y_n\right)/42
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Застосування поліномів більш високих порядків не є доцільним, оскільки при цьому зростає необхідна кількість ординат, а отже буде відбуватись надто сильне вирівнювання графіка, що призведе до завищення споживання у літні місяці і його заниження у зимові. Використання ж поліномів з меншою кількістю ординат, як показали експерименти, не дає достатнього осереднення даних на деяких відрізках, внаслідок чого ліквідовуються не всі випадкові відхилення навантаження.

Сумарний графік навантаження після згладжування зображено на Рисунку 5.

Якщо вважати, що кількість споживачів і осереднене споживання електроенергії одним споживачем залишається незмінною, то графік навантаження також повинен залишатись незмінним. Виходячи з вище вказаного, знаючи графік навантаження за один рік та середнє навантаження на протязі інших років можна побудувати графіки навантаження для будь-якого року. Реальні графіки навантаження можуть дещо відрізнятись одне від одного. Тому для визначення графіка споживання на протязі року будуємо усереднений графік річного споживання за відомою історією електроспоживання.. Для Петровської філії ВАТ "Кіровоградобленерго" цей графік у відсотках від середнього значення має вигляд, зображений на Рисунку 6. В результаті згладжування сумарне споживання за графіком змінилося на 0,06%, що не перевищує похибки лічильників електроенергії класу точності 2.0, за допомогою яких визначається електроспоживання.

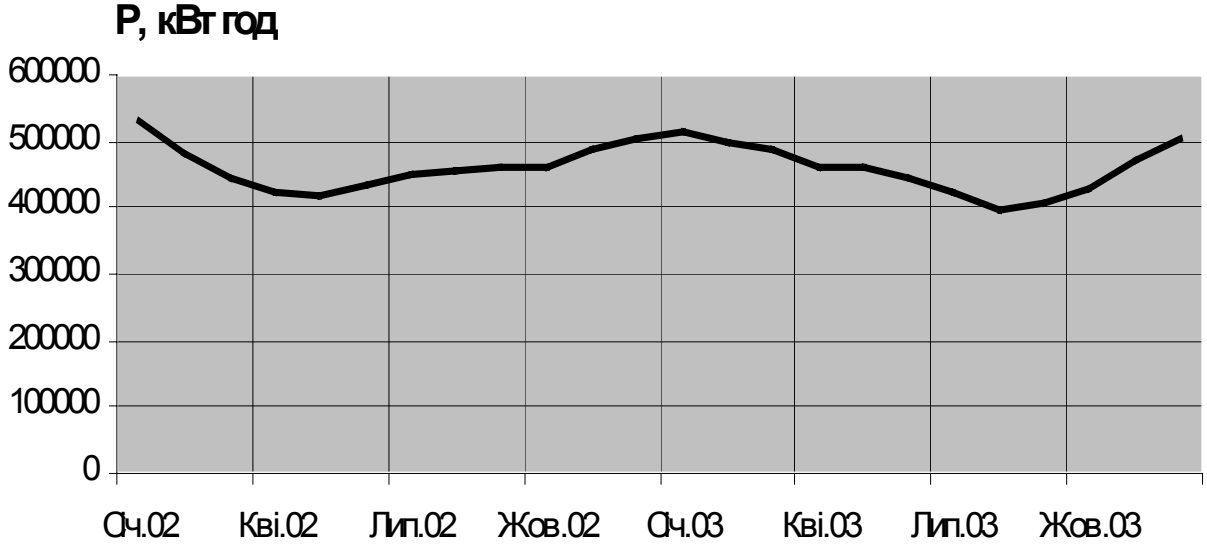


Рисунок 5 - Графік навантаження побутових споживачів Петровської філії ВАТ "Кіровоградобленерго" після згладжування

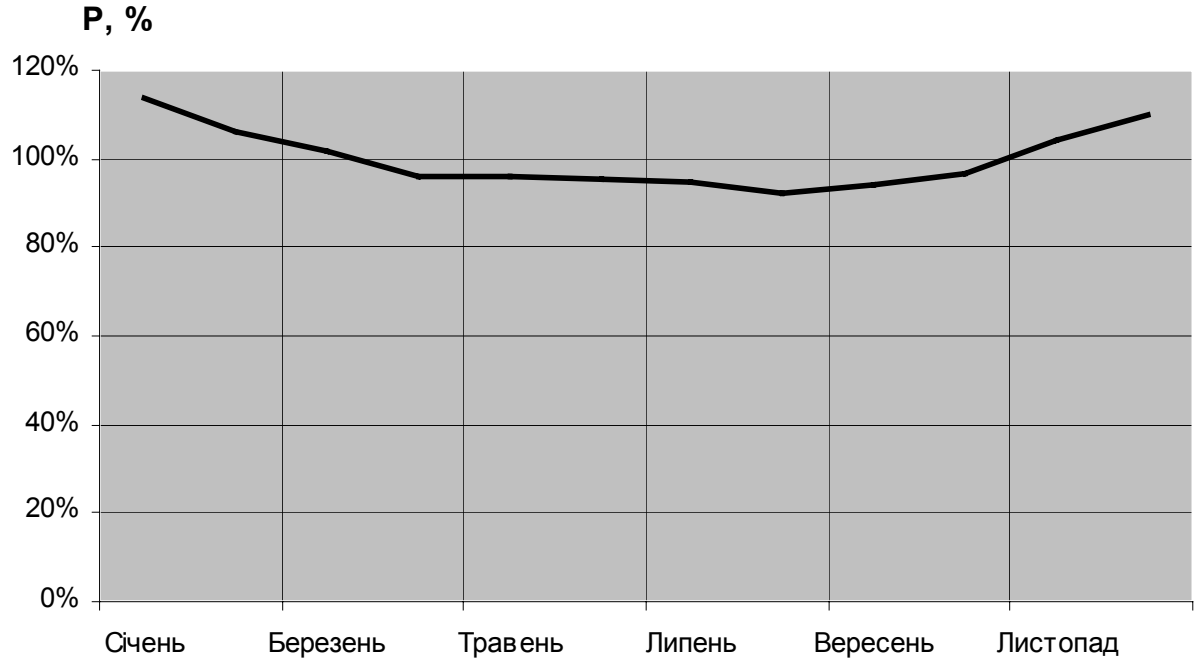


Рисунок 6 - Усереднений графік річного споживання

Якщо прийняти, що кількість споживачів, що живляться від КТП 10(6)/0,4 кВ, на протязі одного року залишається незміною та відкинути дію випадкових і суб'єктивних факторів, то графік споживання для кожної КТП матиме ту ж форму, що і сумарний графік.

Надалі для прогнозування необхідно визначити середнє річне електроспоживання в роки, для яких буде проводитись прогнозування. Для прикладу візьмемо КТП № 210, 249, 331, 16, 169, 228, від яких живляться побутові споживачі. Їх середнє річне споживання за останні 5 років приведено в Таблиці 1.

Таблиця 1 - Середнє споживання по КТП № 210, 249, 331, 16, 169, 228 за останні п’ять років

№ КТП	Споживання за рік, кВт год				
	1999 рік	2000 рік	2001 рік	2002 рік	2003 рік
210	5021	5342	6041	4037	5845
249	1598	1367	1327	1259	1270
331	1138	1134	1123	1114	1106
16	4398	4405	4387	4379	4375
169	2154	2542	2654	2961	3067
228	4849	4542	4320	4339	4098

Для прогнозування середнього річного споживання будемо використовувати нейронну мережу. Це дозволить використовувати декілька різних функцій для проведення апроксимації та мінімізувати середньоквадратичне відхилення значень електроспоживання, отриманих з допомогою апроксимуючих функцій, від реальних значень середнього річного споживання на ділянці інтерполяції. Як вказано в [4], у випадку, коли діапазон вихідних значень виходить за межі відрізку [0,1] чи [-1,1], для задач прогнозування використовують логарифмічну функцію активації нейронних елементів прихованого шару, яка являє собою обернену гіперболічну функцію ареа-синус. Оскільки вхідною величиною являється лише номер року, для якого визначається середнє річне споживання, то застосовуємо гетерогенну нейронну мережу з одним нейронним елементом у кожному шарі з логарифмічною функцією активації нейронного елемента прихованого шару та лінійною функцією активації для вихідного нейрона. Тоді:

1) зважена сума для нейронного елемента прихованого шару

$$S = \omega \cdot x - T_1 \tag{2}$$

де ω - ваговий коефіцієнт нейрона прихованого шару;

T_1 - поріг нейрона прихованого шару;

x - вхідний сигнал нейронної мережі;

2) вихідне значення нейронного елемента прихованого шару

$$y_1 = \ln\left(S + \sqrt{S^2 + 1}\right) \tag{3}$$

3) вихідне значення нейронної мережі

$$y = \nu \cdot y_1 - T \tag{4}$$

де ν - ваговий коефіцієнт вихідного нейрона;

T - поріг вихідного нейрона.

Результати прогнозування середнього річного споживання для перерахованих вище КТП з випередженням на 6 років приведено в Таблиці 2.

Таблиця 2 - Прогнозоване середнє споживання по КТП № 210, 249, 331, 16, 169, 228 на наступні шість років

№ КТП	Споживання за рік, кВт год					
	2004 рік	2005 рік	2006 рік	2007 рік	2008 рік	2009 рік
210	5352	5369,9	5385,44	5399,16	5411,44	5422,57
249	1241	1226,53	1214,3	1203,71	1194,36	1186,01
331	1100,21	1093,9	1088	1082,44	1077,2	1072,24
16	4367,7	4360,79	4353,95	4347,18	4340,47	4333,82
169	3203,38	3316,97	3417,35	3507,25	3588,67	3663,05
228	4071,37	4005,7	3948,89	3898,81	3854,05	3813,58

За визначеним річним споживанням будується графік споживання електроенергії за кожен місяць з допомогою визначеного вище графіка. Графік для КТП № 210 Петровської філії ВАТ "Кіровоградобленерго" приведено на Рисунку 7.

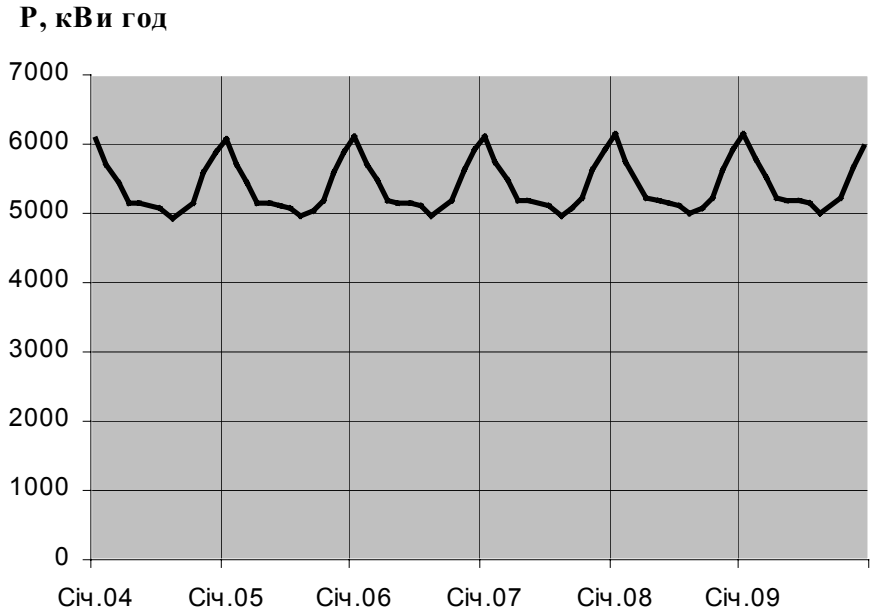


Рисунок 7 - Прогнозований графік навантаження побутових споживачів по КТП № 210 Петровської філії ВАТ "Кіровоградобленерго" на наступні 6 років

За визначеними даними будуються графіки зміни активного і реактивного навантаження на протязі дня для кожного місяця, які надалі використовуються в розрахунках.

На основі наведеної вище методики проведено прогнозування графіків навантаження побутових споживачів Петровської філії ВАТ "Кіровоградобленерго", що живляться від підстанцій напругою 35/10 кВ "Петрово" і "Луганка".

Розроблено методику прогнозування графіків навантаження побутових споживачів сільськогосподарських районів. Вона включає в себе експериментальне визначення середнього споживання електричної енергії за кожен рік та графіка зміни навантаження на протязі року, а також визначення активного і реактивного електричного навантаження на протязі дня за типовими графіками навантаження.

Список літератури

1. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 3. В 2 кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии (Под общ. ред. профессоров МЭИ: И. Н. Орлова (гл. ред.) и др.) 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880с.: ил.
2. Анализ нагрузок сельскохозяйственных потребителей по Днепровской энергосистеме. Отчет по научно-исследовательской работе по теме № 326 за 1978 г. Кировоградский институт сельскохозяйственного машиностроения, Кировоград, 1978 г.
3. Дьяконов В. П. Справочник по расчетам на микрокалькуляторах. –3-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 464 с.
4. Головко В. А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. Кн. 4: Учеб пособие для вузов / Общ. ред. А. И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.: ил. (Нейрокомпьютеры и их применение).

УДК 622.788

В.И. Пожуев, профессор, д-р. фіз.-мат. наук, Ю.М. Пазюк, асп.
Запорожская государственная инженерная академия

Алгоритм расчета структуры полидисперсных железорудных материалов на спекательных тележках агломашин

Рассмотрены принципы построения систем автоматизации агломерационного процесса. Предложен метод оптимизации агломерационного процесса, основанный на контроле и управлении структурой слоя на аглоленте. Приведено математическое описание метода и результаты моделирования.
агломерационный процесс, агломерационная шихта, агломашина, система управления окомкованием, система управления загрузкой шихты на аглоленту, распределение топлива по высоте слоя

Подготовленная к спеканию агломерационная шихта должна удовлетворять ряду требований в отношении химического состава (содержания железа и основности) и физических свойств. Окомкованные частицы должны обладать прочностью, допускающей их транспортировку и загрузку на агломашины без разрушения. Определенные требования предъявляются также к фракционному составу агломерационной шихты [1].

Качество подготовки шихты можно улучшить в результате оптимизации управления насыпной плотностью материала, достижения наиболее рациональных режимов ее окомкования (путем изменения скорости вращения барабана-окомкователя), воздействий на транспортные потоки шихты.

Согласно функциональной схеме оптимизации агломерационного процесса, рис. 1, наряду с локальными системами автоматизации таких основных параметров процесса, как влажность шихты, содержание в ней топлива, высота слоя шихты и скорость аглоленты, в системе используют оптимизирующие воздействия на каждый из указанных регуляторов [2, 3, 4]. Эти воздействия вырабатываются в результате анализа информации, получаемой от ряда датчиков, контролирующих процесс спекания (влажность и углерод шихты, разрежение и температура газа, высота слоя, скорость аглоленты и др.), а так же по информации о качестве получаемого агломерата, его количестве и выходе возврата.

Совокупность всей информации поступает в управляющий вычислительный комплекс (УВК), с помощью которого определяется необходимое количество шихты, а также вырабатываются, в соответствии с заданием оптимизации, корректирующие воздействия на задатчики локальных систем.

Однако и при такой комплексной системе управления с использованием УВК исчерпывающее решение задач оптимизации осуществить будет трудно, в частности, из-за некоторого запаздывания оптимальных решений, которое будет наблюдаться при влиянии текущих возмущений в процессе спекания. Так, если оценивать прочность агломерата по количеству мелочи (0 – 5 мм) в барабанной пробе, то между временем спекания и получением результатов испытаний спека проходит более часа (отбор усредненной пробы, ее доставка, испытания и оценка результата путем грохочения и взвешивания). За такой, относительно длительный, промежуток времени, состояние процесса спекания под воздействием ряда возмущающих факторов настолько изменится, что полученная рекомендация по количеству топлива в шихте окажется ложной для но-

© В.И. Пожуев, Ю.М. Пазюк. 2004

вых установившихся условий процесса. Аналогичным образом отрицательно сказывается запаздывание в получении других качественных показателей.

Еще одно обстоятельство, затрудняющее использование экономического критерия оптимизации, связано с необходимостью периодически изменять задаваемые наиболее благоприятные значения состава агломерата и его количества.

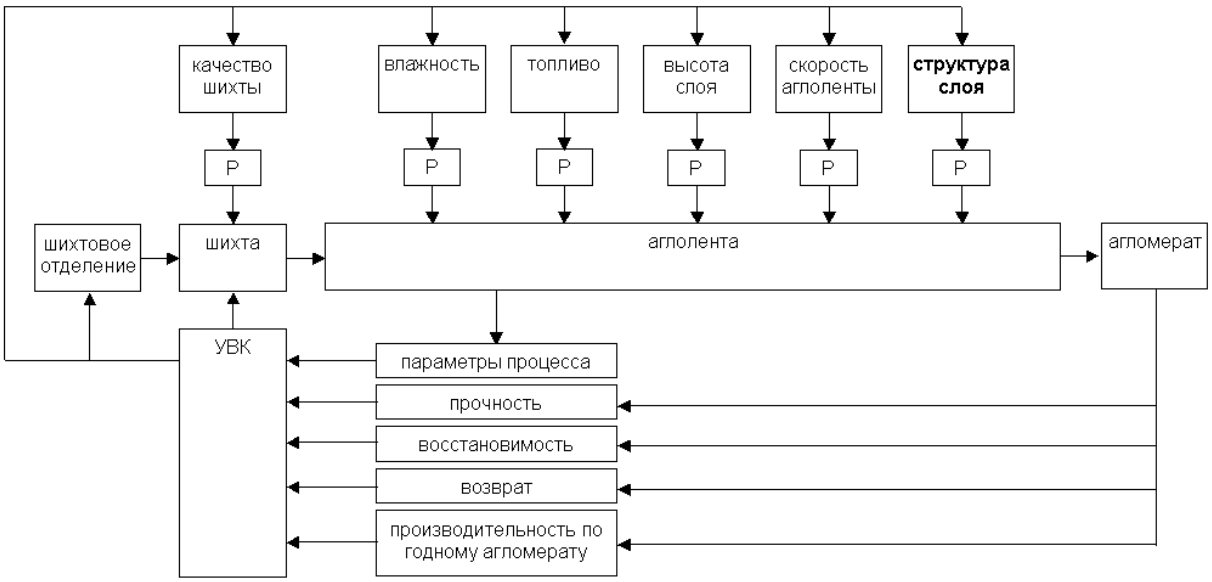


Рисунок 1 - Функциональная схема оптимизации агломерационного процесса

В связи с этим можно сделать вывод, что наряду с критериями оптимизации по экономическим показателям, целесообразно использовать некоторые критерии оптимизации по технологическим параметрам, таким, как степень окомкования, корректировка содержания топлива в шихте по тепловому уровню процесса спекания, высоты слоя по производительности, задаваемому расходу шихты на аглоленту по скорости ее спекания и некоторым другим.

При такой постановке задачи выполнение оптимальных значений указанных параметров обеспечит оптимальные условия процесса агломерации, которые, в свою очередь, будут способствовать достижению оптимальности по экономическому критерию.

При этом необходимо иметь в виду, что некоторые из показателей качества, например содержание железа, пустой породы и, в какой-то мере, основность, не поддаются оптимизирующим воздействиям при производстве агломерата, так как они обусловлены условиями по составу поставляемых шихтовых материалов и получаемого продукта.

Поэтому, используя различные управляющие воздействия при производстве агломерата, можно эффективно влиять только на такие качественные показатели, как отклонения от заданных значений по содержанию железа и основности, а также прочность (содержание мелочи) и восстановимость или расход топлива на спекание.

В связи со сложностью математического описания объекта в целом, целесообразно выполнить его на первом этапе в виде подсистем управления для наиболее типичных и ответственных технологических операций, к числу которых можно отнести управление окомкованием шихты, формированием слоя на аглоленте, а так же подготовку шихтовых материалов [5].

Система управления окомкованием и загрузкой шихты на аглоленту должна обеспечить бесперебойную подачу подготовленного к спеканию материала на аглоленту и стабилизацию свойств агломерационной шихты в слое. Совершенствование техно-

логии процесса агломерации выдвинуло задачу повышения качества управления подготовкой сыпучих материалов, что требует более полного учета физико-механических свойств шихты при ее подготовке к спеканию [6].

В связи с тем, что система стабилизации имеет приоритет по отношению к системе оптимизации процесса подготовки шихты к спеканию, последняя вступает в работу только по окончании переходных процессов в объектах управления, вызванных стабилизацией расхода шихты. Представляется целесообразным расчет режимов работы тракта загрузки, необходимых для стабилизации потока движущегося материала, выполнять поэтапно.

После выполнения операций, связанных с пуском агломашины, на основании исходных данных о высоте слоя шихты на аглоленте $h_{сл}$ и скорости ее движения V_A определяется производительность агломашины по шихте

$$q_{ш} = h_{сл} V_A b ,$$

где b - ширина спекательных тележек, м.

Предварительное задание для локальной САР увлажнения задается на основе расчетного значения $q_{ш}$

$$q_{вл} = q_{ш} K_C ,$$

где $q_{вл}$ - количество воды, подаваемой в окомкователь, м^3/с;

K_C - коэффициент пропорциональности, зависящий от конкретного состава шихты.

Предварительное задание для САР уровня шихты в промбункере и системы управления структурой слоя на аглоленте задается на основе ранее собранной информации о текущем значении уровня шихты в промбункере агломашины, среднем гранулометрическом составе окомкованной шихты и среднем значении возмущений по расходу агломерационной шихты.

Требуемое для достижения заданного уровня в промбункере количество шихты рассчитывается из уравнения

$$\pm \Delta Q = \pm (H_З - H_T) S_{ср} ,$$

где $H_З$ - заданное значение уровня, м;

H_T - текущее значение уровня, м;

$S_{ср}$ - среднее значение площади поперечного сечения промбункера, м^2.

Изменение производительности питателя приемного бункера в этом случае составит

$$\pm \Delta q_в = \frac{\pm q_ш}{t_п}, \ \Delta q_в \le 0{,}25 q_{вср} ,$$

где $t_п$ - время изменения производительности питателя, с.

Для того, чтобы избежать возникновения значительных колебаний расхода шихты, затрудняющих работу системы оптимизации, значение изменения производительности питателя приемного бункера выбирается таким образом, чтобы $\Delta q_в$ не превышало 25% от $q_{вср}$.

Разработанные основные положения алгоритма управления процессом подготовки шихты к спеканию позволяют, при их практической реализации, существенно повысить качество подготовки материала за счет оперативного использования информации о физико-механических свойствах агломерационной шихты.

Производительность агломашины по шихте равна

$$q_в = hbV_A,$$

где h - высота слоя шихты, м.

Как было показано ранее, производительность агломашины изменяется, что вызвано влиянием различных неконтролируемых факторов на условия движения материала по тракту загрузки. Скорость движения материала непостоянна по сечению потока, что вызывает неравномерную загрузку спекательных тележек по ширине. В связи с этим необходимо управлять не только производительностью питателя промежуточного бункера, но также обеспечить равномерность загрузки спекательных тележек по ширине. Для этого требуется информация об изменении высоты слоя по ширине аглоленты в месте загрузки шихты (h_i) и ее отклонениях в точках контроля (Δh_i) от заданного значения $h_з$, $\Delta h_i = h_з - h_i$.

По полученным значениям можно определить изменение производительности питателя $\Delta q_в$, необходимое для обеспечения равенства

$$q_в = q_{ва},\ \Delta q_в = \Delta h_{ср} V,$$

где $\Delta h_{ср}$ - средняя величина отклонения высоты слоя от заданного значения, м,

$$\Delta h_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta h_i}{n}.$$

Изменение величины $q_в$ должно происходить только в случае превышения $\Delta h_{ср}$ 3-5%, $h_{ср} - \Delta h_{ср} \geq \Delta h_{ср\,пор}$.

Текущая производительность питателя составит

$$q_{в\,тек} = q_{в\,ср} \pm \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta h_i}{n} V_A,$$

и достигается изменением положения шиберов на участках контроля высоты слоя по ширине аглоленты.

Чтобы избежать недогруза спекательных тележек и потерь производительности агломашины, или переуплотнения материала и снижения качества агломерата, отклонения высоты откоса шихты на загрузочном лотке от заданного значения не должны превышать –0,05 м.

Процесс спекания шихты в высоком слое выдвигает принципиально новую задачу в управлении загрузкой материала на аглоленту. Как показали результаты исследований, прочность агломерата в значительной степени определяется физико-механическими свойствами окомкованной шихты, в первую очередь ее гранулометрическим составом, влажностью и сегрегацией материала по высоте формирующегося слоя. Задача управления процессом сегрегации заключается в стабилизации оптимального распределения частиц окомкованной шихты по высоте слоя. Как было ранее показано, эффективное управление сегрегацией частиц шихты может осуществляться путем целенаправленного изменения угла наклона загрузочного лотка [7].

Анализ результатов моделирования показывает, что точность моделирования распределения полидисперсного материала по высоте слоя, в основном, определяется количеством фракций и изменяется пропорционально числу циклов расчета. Предложенная методика наиболее эффективна для определения Φ_{ij} 3-х и 4-х фракционных смесей.

Проведенные исследования показали, что распределение массы шихты по высоте слоя на спекательных тележках агломашины определяется фракционным составом

загружаемого материала $(\Phi_1, \Phi_2, ..., \Phi_k)$ и закономерностью его сегрегации, характеризуемой зависимостью $d_{jcp} = f(h_{jcл})$. Расчет распределения отдельных фракций по высоте слоя $\Phi_{ij} = f(d_{jcp})$ может быть выполнен на базе экспериментальных данных с помощью численных методов применительно к конкретным условиям работы загрузочных узлов агломашин.

Для определения механизма взаимосвязи $d_{jcp} = f(h_{jcл})$ целесообразно использовать закономерности движения сферической частицы с условным диаметром d_{jcp} по наклонной плоскости с переменным углом наклона и трением.

На рис. 2 и 3 приведены примеры расчета для условий ЗМК Запорожсталь. Пунктиром обозначена расчетная зависимость до коррекции, сплошной линией – зависимость после коррекции, точками обозначены экспериментальные данные.

Зная зависимость содержания топлива в частицах материала от среднего диаметра этих частиц, становится возможным рассчитать распределение топлива по высоте слоя. Эта зависимость характеризуется следующей формулой:

$$C_i = -0{,}6d_i + 6{,}9\,,$$

где C_i - содержание топлива, %;

d_i - средний диаметр частиц, мм.

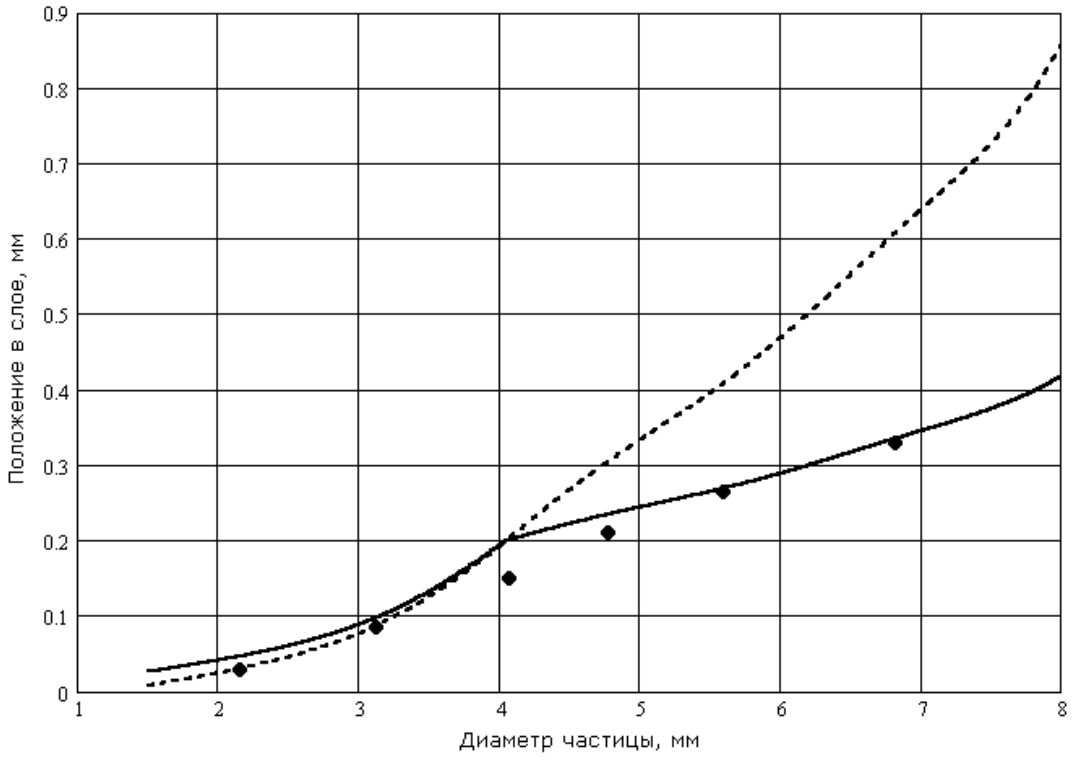


Рисунок 2 - Распределение среднего диаметра частиц по высоте слоя. Запорожсталь, агломашина № 4 (барабанный питатель)

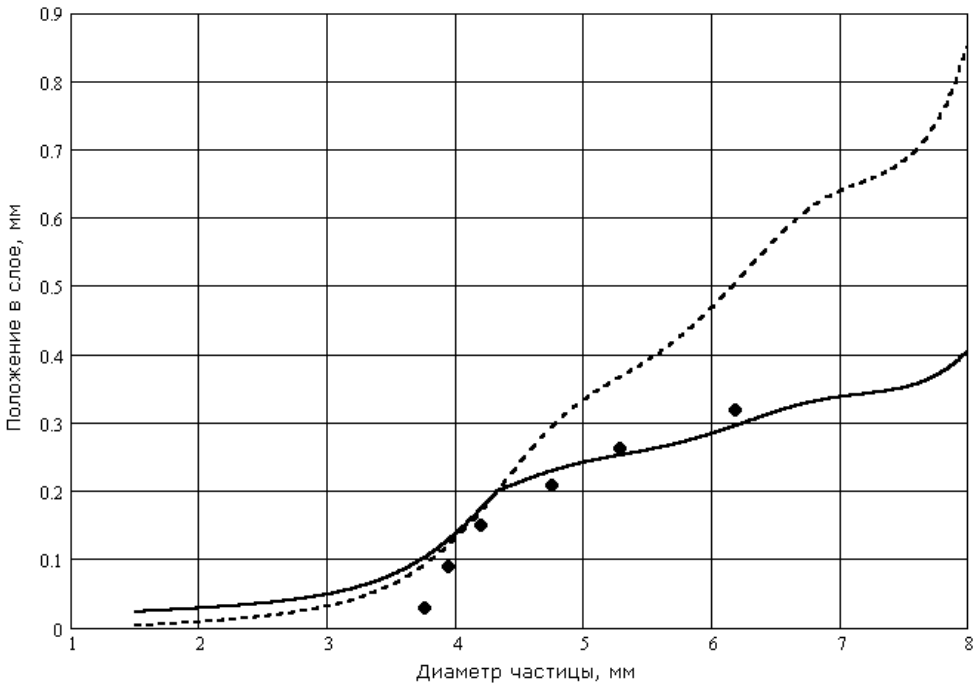


Рисунок 3 - Распределение среднего диаметра частиц по высоте слоя. Запорожсталь, агломашина № 2 (вибрационный питатель)

Приведенная формула получена на основе результатов экспериментов и с высокой точностью позволяет определять содержание топлива в материале.

Выполнено моделирование распределения топлива в материале для барабанного и вибрационного питателя для следующих условий: высота слоя на аглоленте 0,4 м, угол естественного откоса материала 45 градусов, угол наклона загрузочного лотка 45 градусов, длина загрузочного лотка 1 м, средний диаметр частиц 4 мм.

Как показывают результаты моделирования, при неизменных параметрах загрузочного лотка, изменение среднего диаметра частиц оказывает существенное влияние на распределение топлива в слое. При увеличении среднего диаметра частиц, загружаемых на аглоленту, усиливается сегрегация топлива по высоте слоя. При этом, в верхних горизонтах слоя содержание топлива уменьшается незначительно. При изменении среднего диаметра частиц с 3 мм до 6 мм содержание топлива в верхних горизонтах слоя уменьшилось в среднем на 0,05%. В нижних горизонтах слоя наблюдается резкое уменьшение содержания топлива – в среднем на 2,6 – 3,5%. Полученные результаты справедливы как для вибрационного, так и для барабанного питателя.

Изменение угла наклона загрузочного лотка оказывает заметное влияние на распределение топлива по высоте слоя. При увеличении угла наклона загрузочного лотка увеличивается сегрегация топлива по высоте слоя. При использования вибрационного питателя, изменение угла наклона загрузочного лотка оказывает относительно равномерное воздействие на содержание топлива в различных горизонтах слоя. По мере увеличения угла наклона загрузочного лотка от 45 до 60 градусов, в верхних горизонтах содержание топлива увеличивается, в нижних – уменьшается в среднем на 0,3%. В случае применения барабанного питателя, при увеличении угла наклона наблюдается незначительное увеличение содержания топлива в верхних горизонтах слоя, в среднем 0,2%, в нижних горизонтах содержание топлива остается практически неизменным, изменение составляет порядка 0,05%.

Как для барабанного, так и для вибрационного питателя, изменение длины загрузочного лотка оказывает пренебрежительно малое влияние на сегрегацию топлива

по высоте слоя, в целом увеличивая ее, изменения содержания топлива составляют порядка 0,05%.

При уменьшении высоты слоя материала на аглоленте, наблюдается уменьшение сегрегации материала по фракционному составу, и, следовательно, уменьшение сегрегации топлива по высоте слоя.

Колебания уровня шихты в промбункере агломашины не только влияют на работу питателя [8, 9], но и способствуют нестабильности гранулометрического состава окомкованного материала вследствие разрушения гранул во время падения и под действием вышележащих слоев шихты [10]. Сохранение полученного гранулометрического состава в значительной мере достигается синхронным движением шихты по участкам тракта загрузки, что может быть обеспечено системой управления. Так как тракту загрузки присуще большое транспортное запаздывание до 120 с, то в данном случае целесообразно использовать каскадную схему управления [11, 12], в которой осуществляется стабилизация промежуточного параметра – заданного расхода шихты на лотке питателя приемного бункера и коррекция этого задания при отклонении уровня шихты в промбункере от заданного значения. В результате, амплитуда динамической ошибки уменьшилась в 1,62, а время регулирования в 1,2 раза, что обеспечивает, согласно [13], повышение газопроницаемости спекаемого слоя шихты на 5 – 7,4%.

Анализ результатов моделирования распределения топлива по высоте слоя при различных параметрах загрузочного лотка показывает, что с наибольшей эффективностью управлять распределением топлива можно, изменяя угол наклона загрузочного лотка. Изменение длины загрузочного лотка оказывает незначительное влияние на распределение топлива по высоте слоя. Уменьшение высоты слоя материала ведет к уменьшению сегрегации материала по фракционному составу, и, следовательно, к стабилизации содержания топлива по высоте слоя.

Список литературы

1. Глинков Г.М., Маковский В.А. АСУ технологическими процессами в агломерационных и сталеплавильных цехах. – М.: Металлургия, 1981. – 360 с.
2. Ищенко А.Д. Статические и динамические свойства агломерационного процесса. – М.: Металлургия, 1973. – 320 с.
3. Федоровский Н.В. Автоматическое управление технологическими процессами окускования сыпучих материалов. – К.: Техніка, 1976. – 224 с.
4. Маковский В.А., Власюк Ю.Н., Карташов Ю.В. Оптимальное управление агломерационным процессом. Киев.: Вища школа, 1987. – 122 с.
5. Федоровский Н.В., Дементьева Е.М., Руденко А.П. Автоматизация процессов окускования железных руд. Научн. тр. / Ин-т автоматики, Киев: Техніка, 1976.
6. Федоровский Н.В. Разработка АСУ ТП окускованием железных руд. Киев: Знание, 1978. – 20 с.
7. А.С. №621765 (СССР). Система управления загрузкой шихты на аглоленту / Зинченко Ю.М., Пазюк М.Ю., Половой П.А. и др. – Опубл. в Б.И. - №9. – 1978.
8. Контроль работы вибрационных дозаторов / Пазюк М.Ю., Сыромясский В.А., Гетало В.Д., Новиченко С.Т. // Металлургия. – 1987. - №2.
9. Пазюк М.Ю., Сыромясский В.А., Гетало В.Д. Совершенствование управления загрузочным узлом агломашины // Металлургия. – 1985. - №11.
10. Исследование свойств окомкованной шихты при транспортировке и загрузке на аглоленту / Половой П.А., Пазюк М.Ю., Гранковский В.И., Зинченко Ю.М. // Металлургия. – 1987. - №8.
11. Исследование динамических свойств САР уровня шихты в промежуточном бункере / Гранковский В.И., Половой П.А., Николаенко А.Н., Пазюк М.Ю., Погорелов В.Н. // Механизация и автоматизация производства. – 1977. - №9.
12. Николаенко А.Н., Гранковский В.И., Пазюк М.Ю. Приближенный метод определения настроек ПИ-регулятора с нелинейной коррекцией на астатических объектах с транспортным запаздыванием. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1982. - №6.
13. Гранковский В.И., Пазюк М.Ю., Сыромясский В.А. Управление агломерационным процессом. – Киев: Техніка, 1988. – 143 с.

УДК 658.012

А.П. Ладанюк, проф., д-р техн. наук, В.В. Іващук, асп.
Національний університет харчових технологій

Використання адаптивної селекції сигналів в задачах оперативної ідентифікації

Пропонується методика обробки технологічної інформації з метою побудови математичної моделі об'єкта. Отриманий алгоритм не має додаткових вимог до апаратного комплексу та гарантує стійкий розв'язок поставленого завдання в межах адекватного представлення.
нелінійна динаміка, некорельованість шума, симетрія події, вейвлєт-базиси

Часто технологічні об'єкти харчової та хімічної галузей характеризуються складними фізико-хімічними перетвореннями, що потребують переведення опису їх дій у клас нелінійної динаміки. Суттєва частина перетворень в об'єкті пов'язується із неоднозначністю протікання біологічних процесів середовища[1] та великим ступенем зв'язності елементів технологічної системи[2]. Складні взаємодії в системі відбуваються часто хаотично і непередбачено, а прогнозування поведінки такої системи за апріорними даними не може передбачати адекватної поведінки перетворень об'єкта та відповідає вимогам фізичної реалізуємості. Проблема полягає у недостатній визначеності природи технологічних об'єктів[3], тому застосування класичних методів побудови математичних моделей приводить до отримання моделі з великою кількістю ступенів вільності, по відношенню до їх зовнішніх характеристик, виявляється надто чутливою до шумів та періодичних спотворень досліджуваних параметрів. Додаткова проблема полягає у визначенні відповідної структури технологічної системи. Класичні методи структурної ідентифікації ґрунтуються, головним чином, на використанні еталонних моделей, що створені за досвідом інженерів-експертів предметної галузі і лишаються незмінними. За умови еволюції структури технологічного об'єкта може виникати потреба в поповненні бази даних, яка вимагає включення в контур управління особи, що приймає рішення(ОПР). Така вимога свідчить про часткову втрату автономності системи управління[4]. Визначені проблеми вказують на необхідність побудови комплекса синтеза складених структур, які б створювалися за логічним аналізом існуючих структурних рішень. Досить перспективною методикою, що пропонує розв'язок поставленої задачі структурної ідентифікації є використання нейронних мереж. Але, особливо при дослідженні динамічних об'єктів, дана система буде надто чутливою до шумів та навіть отримане рішення буде досить важко представити в явному вигляді[5] або ж коло структур, що здатна розрізняти система, буде незначним. При використанні алгоритмів, що базуються на баєссовських та псевдобаєссовських методах, - системи схильні до помилок при наявності шумів, що корельовані з сигналами досліджуваного контура системи. Остання вада є досить суттєвою, за умов застосування системи до технологічних об'єктів, коли шуми в системі становитимуть сигнали допоміжних контурів управління. Отже не можна стверджувати некорельованість шума та регресорів(координат спостереження)[6], що у випадку використання розповсюдженого на практиці метода найменших квадратів приводить до зміщеної оцінки параметрів моделі об'єкта та, відповідно, збільшення їх дисперсії.

Слід також звернути увагу на порушення нормального режиму функціонування ОУ, за умови використання пошукових методів в адаптивних системах. Навіть на етапі досягнення оптимальних параметрів керуючого пристрою доводиться здійснювати ва-

© А.П. Ладанюк, В.В. Іващук. 2004

ріювання значень настройок, як підтвердження оптимальності отриманого розв'язку. У випадках незадовільного складу сигналу доводиться використовувати зміну вхідних координат значно віддалену від природного джерела вхідної інформації.

Характерною рисою зворотніх задач(задач по відновленню координат за моделлю) є їх некоректність, внаслідок чого - багато відомих обчислювальних алгоритмів є нестійкими, навіть при незначних похибках вхідних даних.

Асимптотичні, ідентифікатор (спостерігач) Люєнбергера та інші спостерігачі, не зважаючи на те, що всі вони досить добре досліджені, широкого практичного застосування не мають. Причиною можна назвати складність реалізації поряд із невисокою швидкістю сходимості в умовах параметричного руху об'єкта управління.

Вказані недоліки існуючих алгоритмів вимагають створення більш перспективних методик організації пошуку моделі структурної взаємодії.

Отже вимірювані сигнали слід завжди сприймати як випадкові, що значно ускладнює задачу фільтрації сигналів спостереження. Алгоритм ідентифікації повинен не тільки відокремити корисний сигнал серед шумів, а й чітко розрізняти параметри корисного сигналу, що одночасно залежать від параметрів динамічного об'єкта.

Головними вимогами до системи структурної ідентифікації є досягнення адекватності із заданою точністю, за будь-якої швидкості еволюції системи, швидка адаптація параметрів новоствореної математичної моделі, за досить високої дисперсії параметрів системи(максимальне зменшення впливів випадкових шумів), гарантія отримання стійкого розв'язку задачі відновлення математичного опису об'єкта.

При розв'язанні задач структурної ідентифікації вхід-вихідних відображень динамічних систем суттєвим є вплив мір залежності випадкових процесів. Найбільш придатними в даному випадку виявляються кореляційні та дисперсійні функції, які для нелінійностей об'єктів виявляють занижене значення міри залежності випадкових процесів, наприклад, у випадку детермінованої залежності між вхідною та вихідною координатою стану об'єкта їх кореляційна функція зменшується до нуля. Відомі випадки, коли навіть за лінійної регресії вихідної змінної на вихідну, залежність між ними є нелінійною і характеризується лише максимальною кореляцією.

В останній час знайшла розвиток теорія про існування відокремлених ознак або симетрії змінювань вхідних дій у відображенні вихідних координат.

Симетрія деякої події, яка має ознаки об'єкта разом із змінами, залишає об'єкт за ознаками цієї події (на виході об'єкта) тотожнім самому собі.

За характеристикою можна виділити наступні особливості симетрії при дослідженні технологічних об'єктів:

- існування інваріант $\{j,..,j_m\}$ подій середовища по відношенню до об'єкта

$$X = f(U), f\{j,..,j_m\}, \exists f^{-1}, M_{об} = f^{-1}\{j,..,j_m\}, \quad (1)$$

де X, U - вихідні та вхідні координати об'єкта, відповідно; f - преретворення інваріант, $M_{об}$ - відновлена модель об'єкта.

- зміни об'єкта, що залишають його тотожнім самому собі за інваріантами;
- можливість відтворюватися за відокремленими ознаками $\{j,..,j_m\}$ після відповідних перетворень f^{-1}.

Між симетрією за ознаками та стуктурою об'єкта існує відповідна залежність. Якщо симетрію об'єкта розглядати як залежність із структурою, то час існування цієї залежності відповідає стійкості системи ідентифікації, що використовується. Відповідно до існування структури моделі $M_{об}$ можна стверджувати існування симетрії:

$$\upsilon(M_{об}) \equiv f\{j,..,j_m\}, \upsilon \cong f, \quad (2)$$

де претворення f, внаслідок некоректності оберненої задачі відновлення моделі $M_{об}$ немають чіткої відповідності до f^{-1}, і може приймати лише наближений розв'язок υ.

На підставі визначених характеристик потрібного робочого сигналу будемо викреслювати його як пробний, в першу чергу за потрібною дисперсією координатного руху. Для отримання незміщенної оцінки моделі об'єкта в процесі роботи системи ідентифікації маємо визначити характер зміни вхідних діянь.

Відокремлені за допомогою обраного базису функцій значення інтегрованих сигналів підлягають наступному визначенню сигнала селекції для кожного канала об'єкта.

Згідно з постановкою задачі, послідовності даних по входу та виходу об'єкта сегментуються за даними про час запізнення в досліджуваних каналах, подані у вигляді перетвореного, в ортогональному базисі, за обраною сплеск-функцією обробки та домінуючою частотою вхідного сигналу. Останнє означає, що вейвлєт-вікно перетворює положення і частоту в фіксованій пропорції від їх центральних значень $f_{сигн}$. Для високочастотних компонент сигналу воно має досить велику ширину по осі частот, але стискає смугу по шкалі часу, не порушуючи тим самим співвідношення невизначеності Гейзенберга для реальних сигналів. Відповідно, низькочастотні сигнали не вимагають при їх вивченні малих часових інтервалів і тому допускають вікна з великою протяжністю по часовій осі і з малою - по осі частот. Таким чином, вейвлєти добре локалізують низькочастотні "деталі" по осі частот і високочастотні характеристики по часовій осі.

Ортонормовані вейвлєт-базиси являють собою унікальний приклад базисів з діагональними або майже діагональними операторами. Дія оператора на вейвлєт-ряди, що представляють дану функцію, не призводить до яких-небудь наслідків, що не контролюються, тобто вейвлєт-розкладання стійке. Можна точно передбачити, що станеться з початковим рядом при впливі на нього оператором і як цей ряд буде перетворений. У певному значенні вейвлєти стійкі відносно операцій інтегрування і диференціювання.

Для перетворення вихідного сигналу спектри представляються за поведінкою у часі та підлягають аналізу, в опрацьованому представленні та подаються у компаратор для визначення конструкції та параметрів моделі. Визначений час запізнення в каналі передається на сегментацію.

Використовується пасивне спостереження за вхід-вихідними сигналами об'єкта з подальшим їх поділом за часом T_c на інформаційні блоки, причому

$$T_c > T_{\mathbf{max}},$$

де T_c -час спостереження, $T_{\mathbf{max}}$ - максимально можливе значення запізнення об'єкту, що встановлюється, попередньо, дослідником та коригується під час роботи системи розпізнавання $T_З$

$$X = f(U), f \xrightarrow[M_{об}]{} T_З. \qquad (3)$$

Такий підхід запобігає негативному впливу на об'єкт, що спричинюється контрольними сигналами активної ідентифікації і не може бути використаний при проведені оперативної ідентифікації під час функціонування технологічних об'єктів.

За зазначених умов функціонування системи досить важливо вчасно визначити функцію відгуку на виході об'єкта. Отже робота блоку селекції починається із перевищенням встановленого, відповідно до точності використаного обладнання, значення максимальної дисперсії I_D навколо значення середньої математичної сигналу спостереження $I_D \geq I_D^{\max}$.

Використовуємо той факт,що при роботі замкненої системи регулювання(спробі вийти на задане значення) на вхід, за керуванням, поступає сигнал подібний “білому шуму”(велика амплітуда зменшується, частота зміни знаку керуючого діяння також змінюється). Задіюючи алгоритм лише на час, потрібний для проведення оперативної ідентифікації, - отримуємо економію апаратних ресурсів системи.

Вхідні U_i та вихідні X_i сигнали підлягають розкладу у ортогональному базисі локально орієнтованих сплеск-функцій W, що попередньо містяться в базі функцій перетворення(БДП) та обираються за здатністю опису сигналів будь-якої форми. Згадана властивість функцій оцінюється за критерієм негентропії I_H розподілу послідовності вхідних сигналів U_i у базисі обраної функції. Такий метод буде в даному випадку оптимальним для використання на ділянці вибору базисної функції, з точки зору швидкості підрахунків. За максимумом I_H визначається домінуюча частота f_∂, відносно якої буде проводитись пошук відображення сигналу U_i у спектрі сигналу X_i. Дані про обрану функцію перетворення $W_{обр}$ та f_∂ передаються у блок обробки (БОСХ)вихідного сигналу X_i (контур адаптивного підстроювання). Блок БОСХ вихідних сигналів, використовуючи функцію $W_{обр}$, починає аналізувати перетворенні спектральні лінії, орієнтуючись (рис. 1) на:

- послідовності на частоті f_∂;
- поведінку енергетичного рівня сигнальних відліків на всіх лініях спектру.

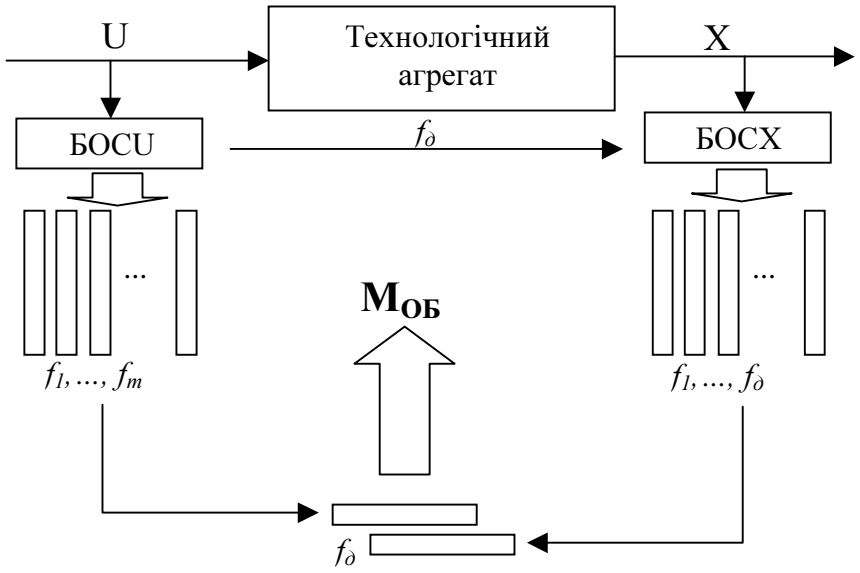


Рисунок 1 - Інформаційний аналіз динамічного об'єкта

У порівнянні перемагає спектральна лінія з частотою

$$f \geq f_\partial$$

та максимальною кількістю енергетичних перетворень на лінії спектру у послідовності вихідних сигналів X_i корельованих із перетвореннями у спектрі послідовностей вхідних сигналів U_i. Перехід

$$f_\partial \rightarrow f_{гх},$$

де($f_{гх}$-головна частота вихідного спектра, де була визначена присутність основної енергії сигналу U_i) змінює частотні характеристики моделі представленого об'єкта.

Відношення миттєвих енергетичних рівнів селектованих сигналів f_{∂} (для U_i) та $f_{сх}$ (для X_i) дає оцінку коефіцієнту підсилення досліджуваного каналу у визначений момент часу.

Ортогональний базис відомої функції завдяки селектуванню створить неявний інформаційний простір, що забезпечить алгоритму розпізнавання додаткової стійкості та зменшить кількість помилок на етапі розпізнавання

$$\langle U, X \rangle \xrightarrow[W_{ОБР}, f_{\partial}]{} \{U_{f1}, .., U_{fj}\}, \{X_{f1}, .., X_{fj}\}. \quad (4)$$

Визначений набір ознак дозволяє обрати математичну модель в базі даних системи ідентифікації.

Оцінка поведінки спектральних змін X_i по відношенню до U_i дає представлення про конструкцію моделі об'єкта (КМО) та в подальшому визначає підстави для відокремлення еталон-моделі.

Подальше вдосконалення процедур подібного типу може стосуватися використання спрощення процедур розрахунку та універсалізації базису, тобто гнучкості алгоритма.

Список літератури

1. Эрриот П. Регулирование производственных процесов. - М.: “Энергия”, 1967г, 480 с.
2. Мищук Р. Ц. Разработка физико-химических основ интенсификации процессов переработки сахара-сырца: Дис...д-ра техн.наук: 05.18.05 / Украинский ун-т пищевых технологий. - К., 1993. - 518л. - л.: 455-495.
3. Антонович А.Л. Исследования по автоматизации процессов очистки сахарного производства : Дис... канд. техн. наук: 05.198/ Киев. технол. ин-т пищ. пром-сти. - Кишинев, 1970. - 203 с.
4. Алиев Р.А. Абдикеев Н.М., Шахназаров Н.Н. Производственные системы с искусственным интеллектом. - М.: Радио и связь, 1990.-264 с.
5. Куссуль Н. Н. Робастные методы оценивания и идентификации в условиях неопределенности: Дис... д-ра техн. наук: 05.13.03 / НАН Украины; Национальное космическое агенство Украины; Институт космических исследований. - К., 2001. - 348л. - Библиогр.: л. 310-342.
6. Жигайло А. М. Статистическая идентификация моделей динамики и ее применение в задачах адаптивного управления: Дис... канд. техн. наук: 05.13.07 / Одесская гос. академия пищевых технологий. - О., 2001. - 206л. - Библиогр.: л. 166-176.

УДК 669.162.1

М.Ю. Пазюк, проф., д-р техн. наук, Н.А. Миняйло, асп.
Запорожская государственная инженерная академия

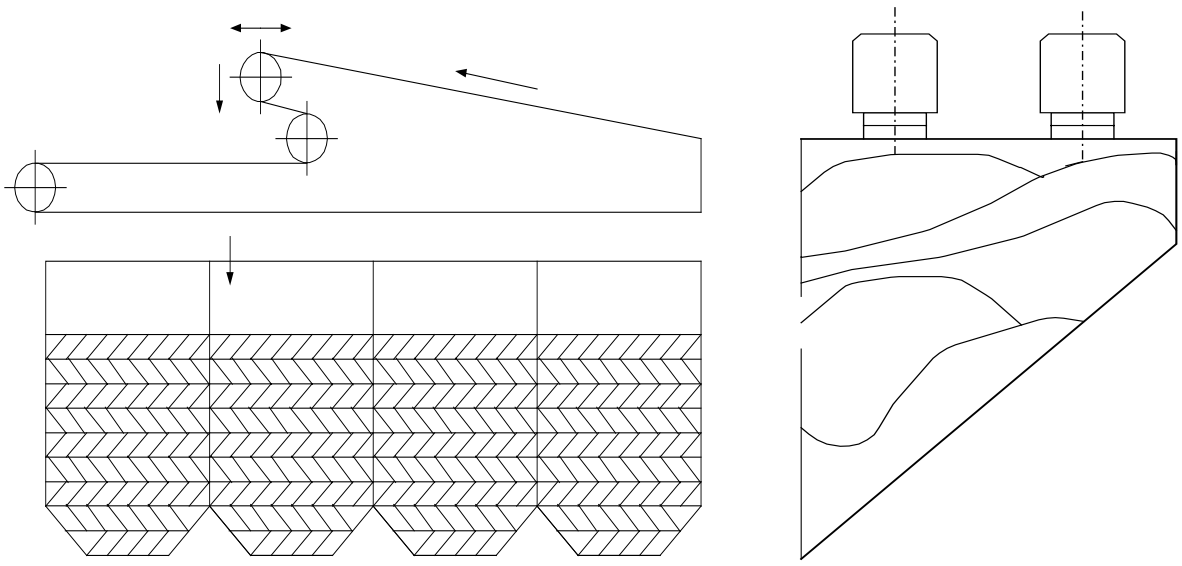
Повышение эффективности усреднения железорудных материалов в закрытых емкостях

В статье рассмотрены основные проблемы процесса усреднения сыпучих полидисперсных материалов в бункерах. Приведены основные факторы, влияющие на данный процесс и пути повышения качества усредняемого материала.
сыпучий материал, сегрегация, усреднение, бункер, эффективность

Процесс усреднения железорудного сырья является важным в цепи подготовки сыпучих материалов к доменной плавке или агломерации.

На практике оправдали себя два способа усреднения: в бункерах и штабелях. Так как размещение штабелей требует значительной территории, то данный способ не всегда применяется на металлургических предприятиях. Наиболее распространенным методом является усреднение материалов в бункерах.

Материал в бункера поступает с рудного двора, с помощью автостел, либо рудногрейферных перегружателей и трансферкар [1] (рисунок 1).



а б

Рисунок 1 - Приемы усреднения материалов при загрузке в бункера с помощью передвигающейся тележки – автостелы (а) и при загрузке из вагонов (б)

Бункер, в реальных условиях, заполняется материалом, имеющим различный химический состав отдельных классов крупности.

Отсюда следует сегрегация материала, а также, в связи с низкой степенью перемешивания, его разусреднение. Поэтому особое внимание уделяется изучению процессов загрузки сыпучих материалов, движения его в бункере и выгрузки.

Если при заполнении бункера происходит сегрегация материала по крупности, то при выдаче такого сырья из бункера колебания показателей качества могут остаться без изменений, уменьшиться или увеличиться. Уменьшение колебания показателей

© М.Ю. Пазюк, Н.А. Миняйло. 2004

качества может произойти в том случае, если разусреднение сыпучего материала, вызванное сегрегацией по крупности, меньше, чем усреднение, обусловленное характером выхода материала при выдаче его из бункера. И, наоборот, если разусреднение, вызванное сегрегацией по крупности выше, чем усреднение в процессе заполнения и опорожнения бункера, колебания показателей качества материала при выдаче из бункера могут возрасти.

Таким образом, для того чтобы объяснить величину изменения степени постоянства показателей качества полидисперсного сыпучего материала при выдаче его из бункера, надо знать кроме степени постоянства качества загружаемого материала и значения сегрегации по крупности также колеблемость показателей качества сырья по классам крупности, которая может быть определена по формуле [2]:

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 \gamma_1 + (x_1 - \bar{x})^2 \gamma_2 + \ldots + (x_n - \bar{x})\gamma_n}{100}$$

где $\bar{x}$ – среднее значение показателя качества материала; x_1, x_2 и т.д. – значения этого показателя в отдельных классах; γ_1, γ_2 и т.д. – значения выхода этих классов.

Оценку сегрегации сыпучего материала при его загрузке в бункер можно оценить по относительному положению, занимаемому различными фракциями [3]:

$$a_k - a_м = \frac{H_1 \cos^2 \alpha_1 \sin \alpha_1}{K_k \sin \alpha_1 - \cos \alpha_1} - \frac{H_1 \cos^2 \alpha_1 \sin \alpha_1}{K_м \sin \alpha_1 - \cos \alpha_1} \qquad (1)$$

где $a_k, a_м$ – положение крупной (+5мм) и мелкой (-1 мм) фракций в бункере, м;

$K_k, K_м$ – соответственно коэффициенты внутреннего трения;

H_1 – высота падения материала, м;

α_1 – угол наклона боковой поверхности шихтового конуса от вертикали, град.

Из выражения (1) следует, что на сегрегацию материала при загрузке его в бункер влияет высота падения загружаемого материала, а, следовательно, и степень заполнения бункера .

При выпуске материала также наблюдается сегрегация материала.

Железорудный материал выходит из бункера не тонкими слоями по всей поверхности воронки выпуска, а блоками, периодически сползающими к ее вершине, причем в блоки объединяется материал, близкий по физико-химическим свойствам. Объем блоков не подчиняется определенной закономерности и является случайным.

Сначала из бункера выходит более мелкий материал из зоны, расположенной над выпускным отверстием [2] (рисунок 2).

Затем по мере истечения воронка выпуска увеличивается, крупность материала возрастает. В конце выпуска из конической части бункера выходит наиболее крупный материал, что приводит к повышению колебаний показателей качества материала.

В связи с тем, что характер движения материала в бункере влияет на процесс усреднения, выделяют следующие общие закономерности эффективности усреднения на различных этапах опорожнения.

Во- первых, вначале выходит материал из центральной осевой части бункера из всех слоев по высоте практически одновременно, что должно определять высокую эффективность усреднения. Однако в связи с тем, что в приосевой части всегда находится более мелкий материал, несмотря на высокую эффективность усреднения

при выходе «столба» материала, расположенного над выпускным отверстием, его качество может отличаться от среднего. Следовательно, если бы удалось устранить разделение по крупности в момент заполнения, то на этом этапе имело бы место эффективное усреднение материала.

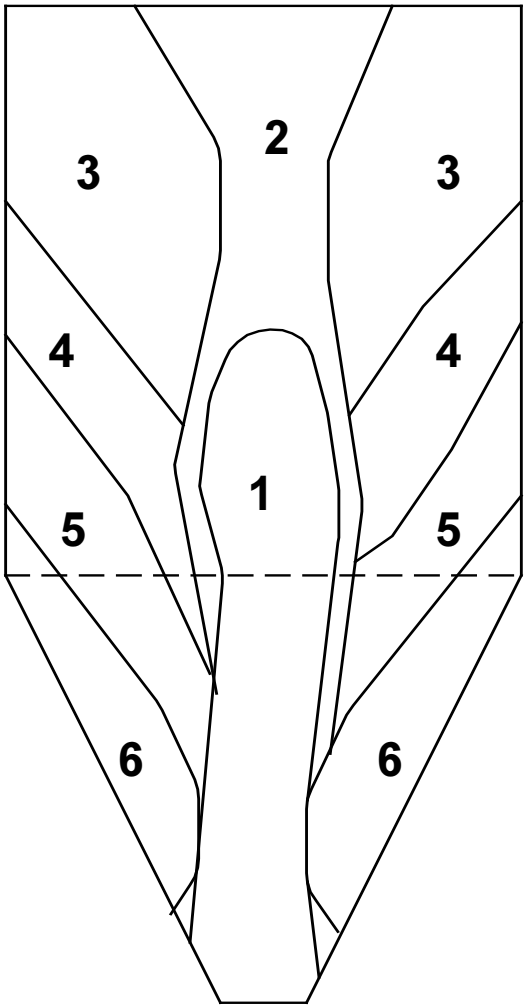


Рисунок 2 - Последовательность выхода материала из бункера

Во- вторых, с увеличением воронки выпуска все большие массы материала принимают участие в движении, что также приводит к улучшению усреднения. На этом этапе происходит усреднение материала, сегрегированного по крупности при заполнении бункера. Однако в связи с тем, что он выходит не по всей поверхности воронки выпуска, а обрушается отдельными блоками, равномерность качества материала будет зависеть от массы блока и места обрушаемого участка.

Изучался также характер выхода сыпучего материала при одновременном заполнении и опорожнении бункера. Эти опыты позволили установить, что из бункера выходит тот материал, который в данный момент в него подается. При этом дополнительно поданный в бункер материал выходит самостоятельно, не смешиваясь до тех пор, пока в бункере остается около 20% вновь поданного материала. После чего происходит смешивание и совместный выход материала, вплоть до остатка в бункере 30%, а затем выходит только ранее поданный материал [2].

Таким образом, если сыпучий материал полностью не выдавать, как это имеет место при обычной схеме работы бункера, то эта часть материала будет находится в

бункере в неподвижном состоянии, не обновляясь до тех пор, пока не будет произведено полное опорожнение.

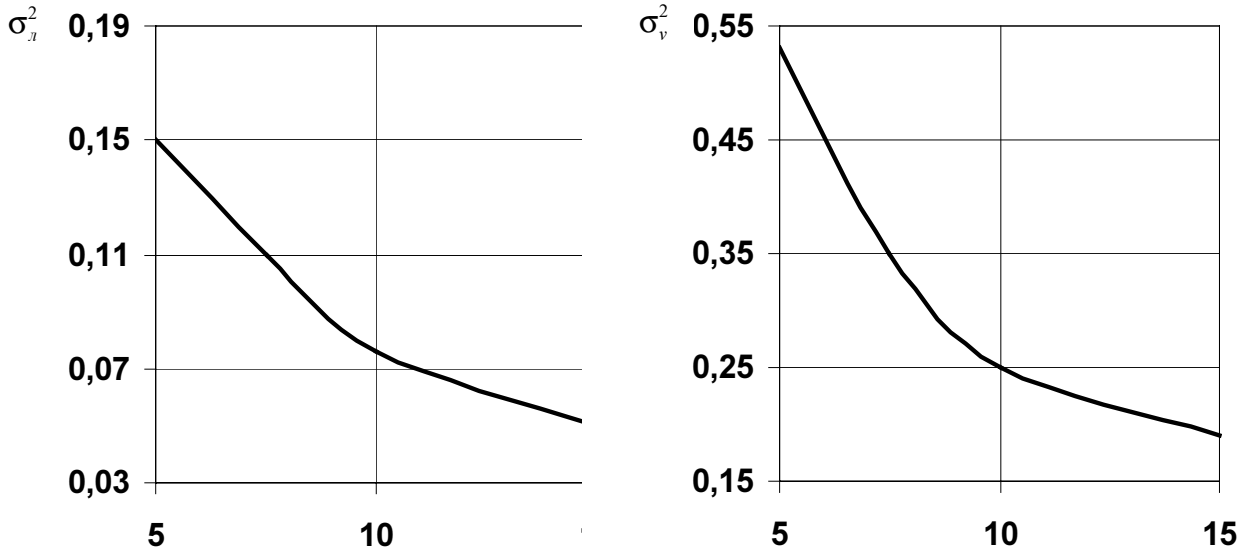
При истечении влажного полидисперсного материала из произвольного бункера большого объема носит прерывистый характер, напоминающий пульсацию. Последнее является следствием образования над выпускным отверстием своеобразной структуры, которая называется динамически разгружающим сводом, т.е. над выпускным отверстием происходит непрерывное образование и разрушение сводов, что и обуславливает прерывистый характер истечения сыпучих материалов из емкостей. В случае образования свода, способного выдержать нагрузку вышележащего материала, истечение из бункера прекращается, и в этом случае требуется дополнительное усилие извне для разрушения свода.

Для определения эффективности усреднения материала в технологическом агрегате используется отношение среднеквадратичных отклонений [2]:

$$K = \frac{\sigma_0}{\sigma}$$

где σ_0, σ – среднеквадратичные отклонения данного показателя качества материала до и после усреднения.

Повышение эффективности процесса усреднения можно достичь при использовании нескольких бункеров. Результаты усреднения угля при использовании нескольких бункеров приведены на рисунке 3 [2].



а б

Рисунок 3 – Колебания показателей зольности (а) и выхода летучих веществ (б) угольной шихты в зависимости от количества одновременно работающих бункеров

При этом эффективность усреднения материала в бункере предлагается определять по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum \sigma_0^2 \gamma}{Kn}$$

где σ_0^2 и σ^2 – дисперсии показателя качества неусредненного и усредненного углей;

n – число одновременно работающих бункеров;

$K = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ – коэффициент усреднения углей в бункере;

γ – долевое участие данного компонента в шихте из каждого бункера.

Таким образом, из проведенного анализа факторов, влияющих на процесс усреднения в бункерах следует, что уже при существующем оборудовании на металлургическом предприятии (тип бункеров, их взаимо расположение, обслуживающие механизмы и т.д.) повысить качество материала с точки зрения его однородности возможно при разработке системы управления загрузкой и разгрузкой полидисперсного сыпучего материала в бункерах. Задачами управления в данном случае будут являться:

- поддержание стабильного значения уровня материала в бункере (не менее 0,8-0,9 от объема емкости [3]);
- учет качества материала поступающего с рудного двора и находящегося в бункере;
- формирование и выдача управляющих воздействий на распределение материала по бункерам и дальнейшую его выгрузку;
- учет предела колебания содержания основных компонентов в исходных материалах, поступающих на аглофабрику;
- расчет необходимого количества бункеров для обеспечения заданного качества получаемого материала.

Список литературы

1. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1981г. – 496 с.
2. Шатоха И.З., Боклан Б.В., Мениович Б.И. Усреднение углей и качество доменного кокса. – К.:Техніка, 1983. – 103 с.
3. Гранковский В.И., Пазюк М.Ю., Сыромясский В.А. Управление агломерационным процессом.- К.: Тэхника, 1988. – 145 с.
4. Вовк А.А.., Чичиянц Г.А. Пособие агломератчику. – К.: Тэхника, 1990. – 143 с.
5. Кулибин В.А. Подготовка руд к плавке. - М.: Государственное научно-техническое изд-во , 1959. – 518 с.

УДК 681.518.5

Ю.А. Козак, проф., д-р техн. наук, В.С. Михайленко
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

Нечеткое управление системой приготовления сырьевой смеси в цементном производстве

В статье предложена непрерывная система дозирования сырьевых компонентов для производства клинкера. Процесс управления осуществляется нечетким контроллером по алгоритму Мамдани.

сырьевые компоненты, коэффициент насыщения, нечеткое управление, нечеткий контроллер

Современный цементный завод представляет собой сложный комплекс технологического оборудования, обеспечивающего переработку сырьевых материалов (известняков, мела, глины и др.) в цемент. Процесс производства цемента заключается в добыче цементного сырья, дроблении и тонком его измельчении, приготовлении однородной сырьевой смеси заданного состава, обжиге ее до спекания, размоле полученного клинкера вместе с небольшим количеством гипса и добавками в тонкий порошок – цемент [1].

Сырьевой материал, добываемый на карьерах, имеет неоднородный химический состав. В то же время высокая производительность цементного завода по клинкеру с сохранением его качественных характеристик может быть достигнута лишь при использовании сырьевой смеси постоянного химического состава.

Расчет двухкомпонентной сырьевой смеси производится по заданной величине коэффициента насыщения (КН) и при известном химическом составе каждого компонента (известняка и глины) [3]. Состав смеси характеризуется количеством частей одного из компонентов, приходящихся на одну часть другого компонента. Так, если x частей первого компонента приходится на 1 часть второго компонента, то необходимое содержание основных окислов в двухкомпонентной сырьевой смеси может быть выражено следующими уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} C_0 &= (x\,C_1 + C_2)/(x+1); \qquad A_0 = (x\,A_1 + A_2)/(x+1); \\ S_0 &= (x\,S_1 + S_2)/(x+1); \qquad F_0 = (x\,F_1 + F_2)/(x+1), \end{aligned}\right\} \tag{1.1}$$

где C_0, S_0, A_0, F_0 – процентное содержание основных окислов (CaO; SiO_2; Al_2O_3; Fe_2O_3) в сырьевой смеси, обеспечивающее получение клинкера с заданным коэффициентом насыщения;

C_1, C_2, A_1, A_2, S_1, S_2, F_1, F_2 - процентное содержание основных окислов в первом или во втором компоненте.

Для определения величины x значения C_0, S_0 , A_0, F_0 подставляют в упрощенную формулу коэффициента насыщения

$$KH = (C_0 - (1,65\,A_0 + 0,35\,F_0)) / 2,8\,S_0. \tag{1.2}$$

Так как заранее неизвестно, какое количество CaO, SiO_2 и SO_3 останется в клинкере в свободном состоянии (SO_3 частично улетучивается в процессе обжига), то решают эти уравнения относительно x, получая путем соответствующих преобразований расчетную формулу, устанавливающую, какое количество частей первого компонента (x) требуется взять на 1 часть второго компонента, чтобы получить клинкер с заданным коэффициентом насыщения

$$X = (2.8\,S2\times KH + 1.65A2 + 0.35F2 - C2)/(C1 - 2.8S1\times KH - 1.65A1 - 0.35F1) \tag{1.3}$$

© Ю.А. Козак, В.С. Михайленко. 2004

Таблица 1 – Процентное содержание химических элементов в сырьевых компонентах

Наименование	CaO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	Прочие	Потери при прокаливании	Сумма
Известняк	54,94	1,92	1,03	0,63	0,53	40,95	100,0
Глина	2,54	64,79	14,45	7,43	6,03	4,76	100,0

Коэффициент насыщения принимается 0,92. При данном химическом составе известняка и глины соотношение их (X) в сырьевой смеси должно быть равно :

$$X=(2.8\times64.79\times0.92+1.65\times14.45+0.35\times7.43-2.54)/(54.94-2.8\times \times1.92\times0.92-1.65\times1.03-0.35\times0.63)=187.16/48.18=3.89/1 \quad (1.4)$$

Следовательно, на каждую часть глины потребуется взять 3,89 ч. известняка. В процентном выражении это составит: известняка – 79,95, глины – 20,05.

Если состав известняка и глины, добываемых в карьерах, изменится например CaO = 60,8% (известняк), а SiO2 (глина) = 59,92% то после расчета

$$X = (2.8\times60,80\times0.92+1.65\times14.45+0.35\times7.43-2.54)/(59.92-2.8\times \times1.92\times0.92-1.65\times1.03-0.35\times0.63)=187.16/48.18=3.40/1 \quad (1.5)$$

Следовательно, на каждую часть глины потребуется уже взять 3,40 ч. известняка, т.е. соотношение расходов будет другим. Управление процессом приготовления сырьевой смеси в потоке осуществляется в предположении стабильного химического процентного состава компонентов. Система стабилизации поддерживает заданный расход сырьевых материалов глины и известняка, поэтому при изменении процентного содержания составляющих их элементов (CaO и SiO2) полученная смесь будет неудовлетворительной. На действующих предприятиях данная смесь подвергается корректировке, т.е. добавлению недостающих химических элементов.

Авторы предлагают новый подход, основанный на нечетком управлении, позволяющий получить смесь требуемого состава без добавок см. рис. 1

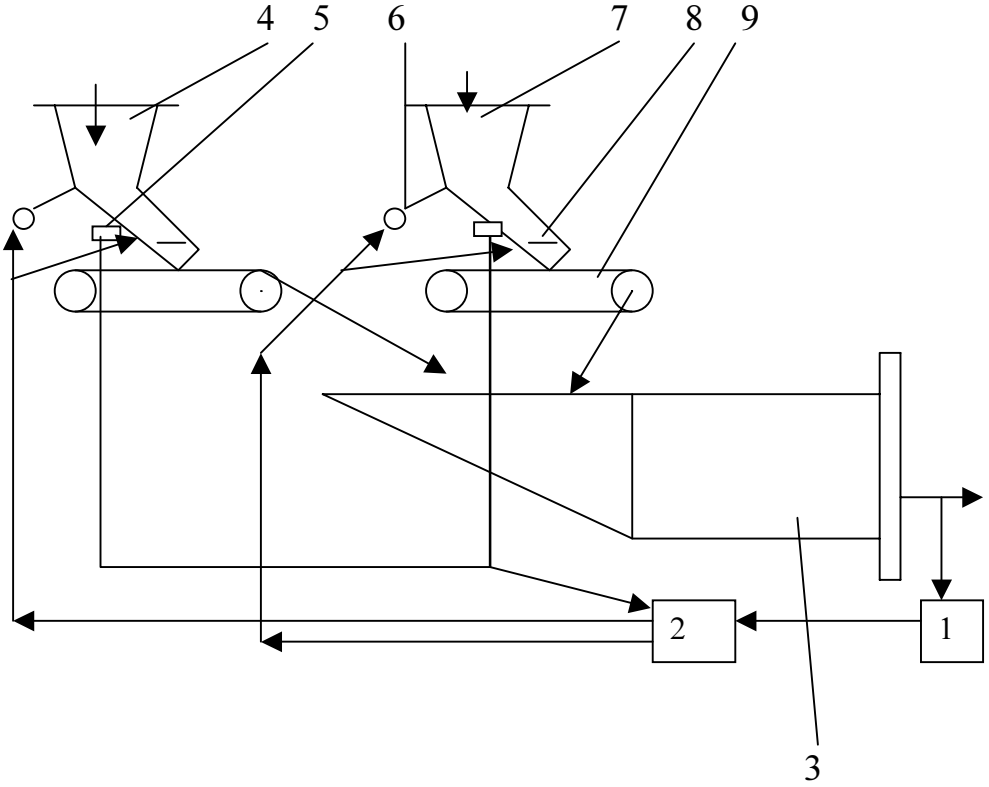


Рисунок 1 - Схема непрерывного автоматического регулирования химического состава сырьевой смеси с нечетким контроллером

На рисунке 1 рассматривается вариант, предусматривающий автоматическое регулирование химического состава сырьевой смеси в потоке, где 1 – анализатор химического состава клинкера, 2 – нечеткий контроллер, 3 – мельница, 4 – лотковый вибропитатель с глиной, 5 – тензодатчик, 6 - .вибратор, 7 – лотковый вибропитатель с известняком, 8 – заслонка, 9 – ленточный транспортер.

Нечеткий контроллер- 2, в который поступает информация о составе смеси из анализатора -1 и текущем расходе от датчиков – 5 вырабатывает два управляющих воздействия. Первое в виде перемещения заслонок 8, с целью изменения площади выходного отверстия в питателях, т.е. расхода сырьевых материалов и второе – выбор режимов вибрации электровибраторов – 6 в случае прекращения истечения материала в питатели при начальной стадии образования свода или застревании кусков материала в проходном отверстии питателя. Нечеткий контроллер, функционирующий по алгоритму Мамдани, вырабатывает управляющие воздействия по правилам ЕСЛИ ТО.

Сырьевые компоненты, входящие в состав известняка варьируются в определенном диапазоне. Например, самый большой компонент в известняке по процентному содержанию CaO лежит в диапазоне от 50 до 65% , а глины - SiO2 в 50 до 70%

Произведем их фаззификацию [5]

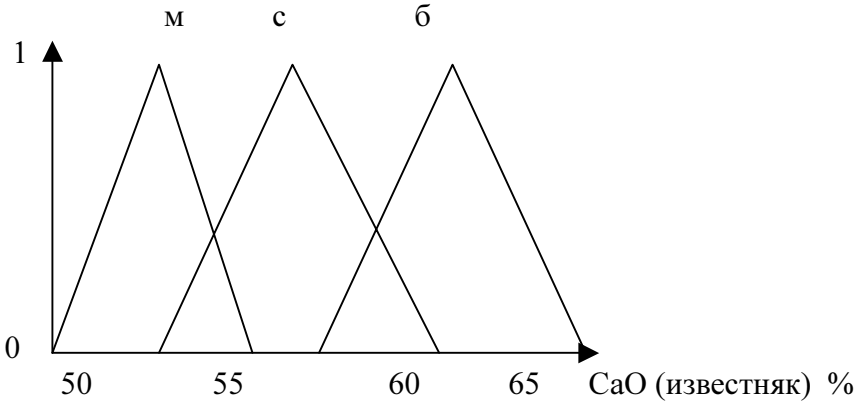


Рисунок 2 - График функций принадлежности для трех термов лингвистической переменной «CaO»

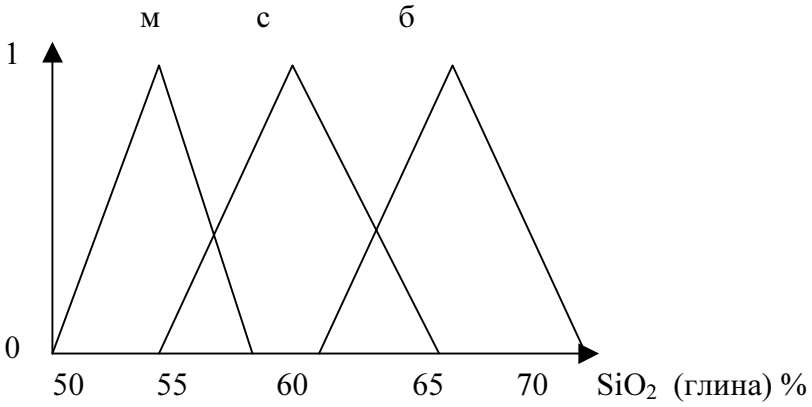


Рисунок 3 - График функций принадлежности для трех термов лингвистической переменной «SiO2», где М – малый, С – средний, Б – большой

Нечеткие правила вывода могут иметь следующий вид:

Например, ЕСЛИ CaO средний ТО расход известняка средний,

ЕСЛИ SiO2 большой ТО расход глины малый.

Фаззификацию расхода сырьевых компонентов см. на рисунке 4, 5.

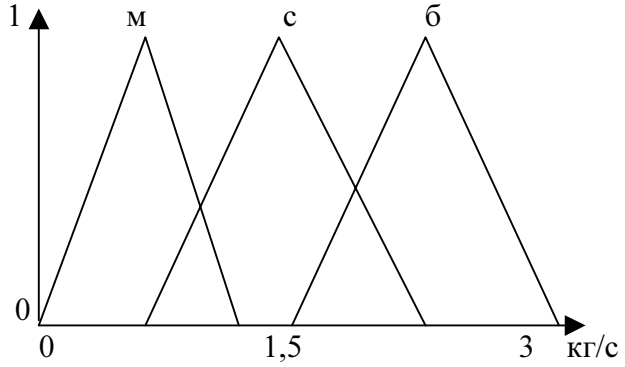


Рисунок 4 - График функций принадлежности для трех термов лингвистической переменной «расход глины»

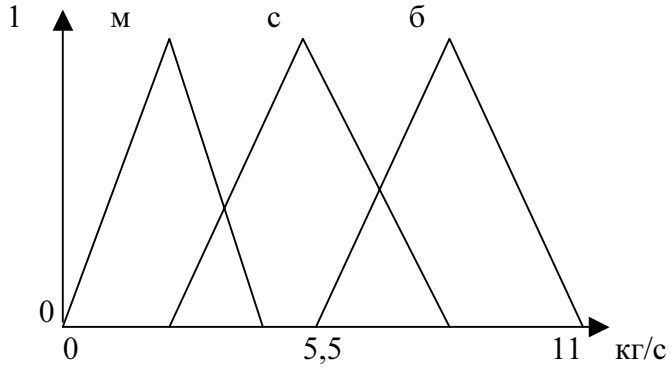


Рисунок 5 - График функций принадлежности для трех термов лингвистической переменной «расход известняка»

Регулирование расхода известняка и глины происходит за счет изменения угла поворота заслонки перекрывающей выходное отверстие лоткового вибропитателя. Нечеткие правила управления расходом компонентов принимают следующий вид:

ЕСЛИ расход глины мал ТО угол поворота мал

ЕСЛИ расход известняка средний ТО угол поворота средний.

Фаззификацию угла поворота открытия заслонки см. на рисунке 6.

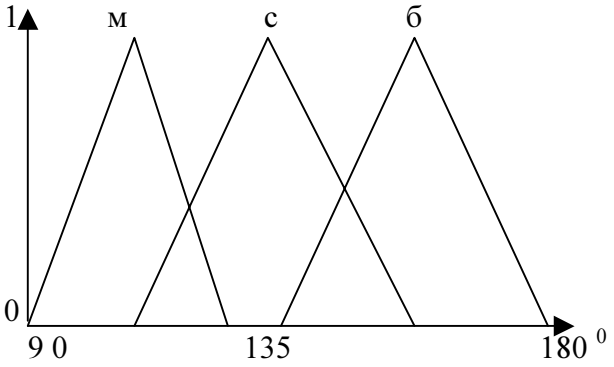


Рисунок 6 - График функций принадлежности для трех термов лингвистической переменной «открытие заслонки»

В нечетком алгоритме, по которому работает контроллер, предусмотрены правила позволяющие избежать процессов сводообразования, что повышает производительность приготовления смеси.

Одно из правил по второму управляющему воздействию:

ЕСЛИ плохо сыплется ТО вибрация большая.

Фаззификация второго управляющего воздействия – изменения вибрации представлена на рисунке 6.

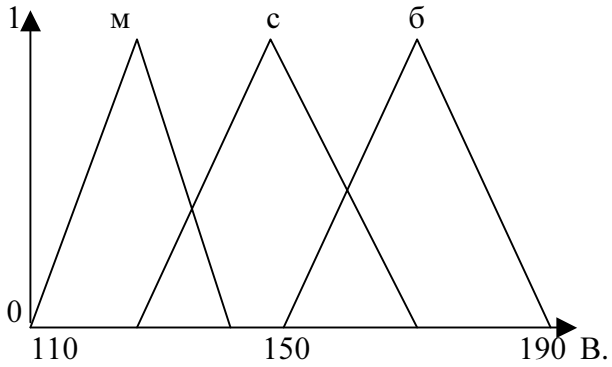


Рисунок 7 - График функций принадлежности для трех термов лингвистической переменной «вибрация»

Поддержание требуемого расхода осуществляется за счет изменения амплитуды и частоты колебаний электровибратора.

Регулирование производительности достигается изменением амплитуды и частоты колебаний. Амплитуда колебаний и производительность зависят от величины подводимого к обмоткам электромагнитов напряжения, см. рисунок 7.

Общая структура микроконтроллера, использующего нечеткую логику, содержит в своем составе следующие составные части [6]:

- Блок фаззификации;
- Базу знаний;
- Блок решений;
- Блок дефаззификации.

Блок фаззификации преобразует четкие величины, измеренные анализатором и расходомером в нечеткие величины, описываемые лингвистическими переменными в базе знаний. Блок решений использует нечеткие условные (ЕСЛИ ТО) правила, заложенные в базе знаний, для преобразования нечетких входных данных в требуемые управляющие воздействия, которые также носят нечеткий характер. Блок дефаззификации преобразует нечеткие данные с выхода блока решений в четкую величину, которая используется для управления объектом.

Основу программного кода, генерируемого пакетом fuzzyTech 5.5, составляет аппаратно – ориентированное на конкретный тип процессора ядро. Поставляемое с пакетом программное ядро совместимо с такими контроллерами как 8096 BH, 8019MC, 80196 NT/NQ и др. Контроллер подключается к ПЭВМ через последовательный COM порт. После подключения и выбора соответствующего меню в пакете происходит передача программного кода в ППЗУ контроллера [5].

В качестве реальных микроконтроллеров, поддерживающих нечеткую логику, выступают: 68HC11, 68HC12 фирмы Motorola, MCS – 96 фирмы Intel, и другие.

Аппаратный микропроцессор нечеткой логики принимает аналоговые сигналы, переводит их в нечеткий формат, а затем, применяя соответствующие правила, преобразовывает результаты в формат обычной логики и далее в аналоговый сигнал, поступающий на исполнительные механизмы.

Перед запуском АСУТП дозирования компонентов, проводятся замеры химического состава смесей, а затем оператор АСУ в программе управления процессом

(FuzzyTech) указывает диапазон фаззификации процентного содержания химических элементов в сырьевых компонентах (малый, средний, большой) [4]. В процессе работы производятся замеры проб, и оператор делает корректировки диапазона в программе управления. В случае выхода из строя контроллера оператор переходит на ручной режим управления посредством визуализации рабочего процесса на мнемосхеме созданного при помощи системы Genesis.

Моделирование процесса дозирования в пакетах Fuzzy Logic Toolbox и FuzzyTech 5.5 , а также лабораторные эксперименты доказывает эффективность данного подхода.

Таким образом, система оказывается более надежной и экономически выгодной т.к. позволяет повысить качество клинкера, сэкономить дополнительные добавочные компоненты и топливо.

Список литературы

1. Рогинский Г.А. Дозирование сыпучих материалов. ─ М.: Химия, 1978. ─ 174 с.
2. Дженике Э.В. Складирование и выпуск сыпучих материалов. /Под. ред. М.И. Агашкова. – М.: Мир, 1968. ─ 164 с.
3. Видинеев Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия. ─ М.: Энергия, 1978. ─ 184 с.
4. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech. ─ С. - Птб.: БХВ, 2003. ─ 720 с.
5. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений . ─ М.: Мир, 1976 . ─ 289 с.
6. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/ Под. ред. Д.А. Поспелова ─ М.: Радио и связь, 1982. . ─ 490 с.

УДК 519.2

В.П. Лисенко, проф., Б.Л. Головінський, В.М. Решетюк, доценти, канд. техн. наук, А.А. Руденський
Національний аграрний університет України, м. Київ

Енергоощадний алгоритм управління умовами утримання курей-несучок у промисловому пташнику

У статті описано алгоритм управління, який будується на основі визначення закономірностей зміни дій збурення на технічний об'єкт з врахуванням зон нечутливості біологічних об'єктів.
алгоритм управління, біологічний об'єкт, пташник, збурення, температурні зони, марківський процес, ефективність управління

Сучасні алгоритми управління умовами утримання біологічних об'єктів тваринного світу передбачають в основному стабілізацію таких параметрів мікроклімату, як температура, відносна вологість повітря, газовий склад, а також програмне управління процесами годівлі, освітленості, збору продукції та видалення відходів. Враховуючи, що біологічні об'єкти тваринного світу мають певну зону нечутливості до зміни параметрів мікроклімату [1, 2], їх стабілізація часто не забезпечує можливість заощадження енергії при управлінні.

Пропонується алгоритм управління, який будується на основі визначення закономірностей зміни дій збурення на технічний об'єкт з врахуванням зон нечутливості біологічних об'єктів, а також залежностей зміни їх продуктивності та витрат кормів від умов утримання в технічному об'єкті.

Основним фактором збурення на технічний об'єкт управління є температура зовнішнього середовища. Багаторічні дослідження цього параметра на 48-50 паралелі (місце знаходження Києва) показали, що екстремальні річні зміни становлять (-42 ... +44) °С. Типовими ж є щорічні зміни в межах (–17 ... +31) °С. Аналіз місячних реалізацій зміни температури за 2003-2004 роки, отриманих за даними Гідрометцентру України, показав, що окремі ділянки цих реалізацій можуть вважатись реалізаціями стаціонарного випадкового процесу з математичними сподіваннями від -15 до +28 °С і кореляційними функціями виду:

$$R_1(\tau) = D_1 e^{-\alpha_1|\tau|},\ \ R_2(\tau) = D_2 e^{-\alpha_2|\tau|}\cos(\omega_2\tau),\ \ R_3(\tau) = \frac{D_3}{2}(e^{-\alpha_3|\tau|} + \cos(\omega_3\tau)), \qquad (1)$$

де D_1, D_2, D_3 – дисперсії;

τ – зсув;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \omega_2, \omega_3$ – постійні коефіцієнти.

При цьому значення дисперсій D_1, D_2, D_3 знаходяться в межах (2 ... 4) °С.

Відтворення реалізацій стаціонарних випадкових процесів для встановлення їх дії на технічний об'єкт проводилось за допомогою визначення формуючих фільтрів [3] та пропускання "білого шуму" через формуючий фільтр у програмному середовищі Matlab Simulink [4].

Динамічні характеристики технічного об'єкта визначались на основі рівнянь теплового балансу, до яких включались такі складові:

$$Q_{пташ} = Q_{нагр} + Q_{повітр} + Q_{огор} + Q_{тв} + Q_{с.р} + Q_{осв} + Q_{вип}, \qquad (2)$$

© В.П. Лисенко, Б.Л. Головінський, В.М. Решетюк, А.А. Руденський. 2004

де $Q_{пташн}$ – кількість теплоти, яка іде на зміну температури пташника;

$Q_{нагр}$ – кількість теплоти, яка приходить від нагрівальних пристроїв (враховується тільки в зимовий період);

$Q_{повітр}$ – кількість теплоти, яка надходить від повітрообміну;

$Q_{огор}$ – кількість теплоти, яка втрачається через зовнішні огородження;

$Q_{тв}$ – кількість теплоти, яка виділяється біологічними об'єктами;

$Q_{с.р}$ – кількість теплоти, яка надходить від сонячної радіації;

$Q_{осв}$ – кількість теплоти, що виділяється при освітленні приміщення;

$Q_{вип}$ – кількість теплоти, яка втрачається на випаровування вологи з відкритих поверхонь.

Співставлення значень постійних часу формуючих фільтрів збурень і постійних часу пташника як технічного об'єкта управління показало, що постійна часу пташника на 2 порядки менша за постійну часу формуючого фільтра. Цей факт дає підстави стверджувати, що для здійснення стабілізуючих режимів у пташнику достатньо звичайного пропорційного регулятора, який здатний забезпечити точність стабілізації параметра у відповідності з характеристиками інформаційно-вимірювального каналу й усталеної статичної помилки.

Біологічний об'єкт характеризують його станом. Залежно від стану біологічного об'єкта змінюється загальний обмін речовин, який впливає як на його продуктивність, так і на споживання кормів. За даними фізіологів стан біологічного об'єкта тваринного світу залежить від параметрів навколишнього середовища, у першу чергу таких, як температура, відносна вологість повітря та його газовий склад. Кількісно стани можна характеризувати температурними зонами, що простягаються на весь період утримання об'єкта. Ширина зони залежить від нечутливості об'єкта до незначних змін параметрів навколишнього середовища і визначається не лише температурою, а й іншими збуреннями і віком об'єкта.

У процесі утримання біологічний об'єкт може знаходитись у різних зонах, але перебування у пригранічних зонах повинно бути обмеженим і його стан не повинен сягати граничних значень температури, при досягненні яких об'єкт гине. Найбільш придатною є зона "термічної нейтральності" [1], або комфортна зона. Її межі досить досконало визначено для різних видів біологічних об'єктів. Так для курей-несучок ця зона коливається в межах (12 ... 15) °С при відносній вологості повітря (65 ... 75)% і кратності повітрообміну не нижче 12 раз на годину. При підвищеній або низькій вологості повітря ця зона звужується на 10%. При кратності повітрообміну нижче 10 комфортна зона взагалі відсутня. Враховуючи відсутність чутливості біологічних об'єктів до змін температури у межах ±(1 ... 2) °С, інші зони приймались теж шириною 3 °С. Поглинаючі границі для курей-несучок мають значення: нижча – 0 °С, вища – 40 °С. Тому всього може бути 13 зон.

Аналіз характеристик технологічного обладнання, що використовується в тваринницьких та птахівницьких комплексах, дозволив встановити, що потужності регулюючих органів технічного об'єкта управління не можуть компенсувати дію всіх реальних збурень і забезпечити перебування біологічних об'єктів постійно у комфортній зоні і, як буде показано далі, з точки зору ефективності ведення технологічного процесу в цьому часто немає необхідності. Тому біологічний об'єкт за весь час його утримання може перебувати у різних температурних зонах. Тривалість перебування біологічного об'єкта в тій чи іншій зоні і характеризує ефективність процесу управління.

Для визначення тривалості перебування біологічного об'єкта у різних зонах процес блукання його по зонах моделювався дискретним марківським процесом з неперервним часом. Найбільш придатною для біологічних об'єктів є модель "загибелі і розмноження".

Система диференціальних рівнянь цієї моделі має вигляд [5]:

$$\begin{cases} \dfrac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda_0 p_0(t) + \mu_1 p_1(t), \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \dfrac{dp_k(t)}{dt} = -(\lambda_k + \mu_k) p_k(t) + \lambda_{k-1} p_{k-1}(t) + \mu_{k+1} p_{k+1}(t), \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \dfrac{dp_n(t)}{dt} = -\mu_n p_n(t) + \lambda_{n-1} p_{n-1}(t), \end{cases} \quad (3)$$

де $p_0(t),..., p_n(t)$ – ймовірності перебування системи відповідно в нульовій, ... n-ній зонах;

λ_k і μ_k (k = 0, 1, ..., n) – інтенсивності потоків переходу з однієї зони в іншу.

Початкові умови для інтегрування системи (3):

$p_0 = 1;\ p_1(0) = p_2(0) = ... = p_n(0) = 0$.

Визначення інтенсивностей потоків здійснювалось шляхом обробки реалізацій зміни температури в технічному об'єкті за методикою, запропонованою в [6].

У зв'язку з тим, що розглядались ділянки збурень на об'єкт, у яких дисперсії відхилень мали межі (2 ... 4) °С, біологічний об'єкт міг знаходитись лише у двох-трьох сусідніх зонах. У цьому випадку визначення статистичних характеристик тривалостей перебування біологічного об'єкта у тій чи іншій зоні значно спрощується. Так формула для густини розподілення ймовірностей часу перебування об'єкта Т у стані k дорівнює [5]

$$f_k(t) = \lambda_{k,k+1} e^{-\lambda_{k,k+1} t}. \quad (4)$$

При цьому, середній час перебування системи у зоні k становить

$$M[T] = \frac{1}{\lambda_{k,k+1}}, \quad (5)$$

а його дисперсія

$$D[T] = \frac{1}{\lambda^2_{k,k+1}}. \quad (6)$$

Якщо час перебування об'єкта у різних зонах відомий, а також відомі залежності продуктивності біологічного об'єкта від споживання ним кормів, можливо здійснити оцінку ефективності управління процесом утримання курей-несучок (попередньо за допомогою вищенаведеного алгоритму розраховані раціональні управляючі дії для всіх можливих збурень і введені у базу даних цифрової системи керування). При цьому на систему управління покладається задача визначення характеру збурень і вибору з бази даних раціональних управлінь.

Розглянемо приклад застосування алгоритма вибору управляючих дій для цегляного пташника на 30 тис. курей-несучок розміром 72×18×3,1 м.

Пташник оснащений 22 витяжними осьовими вентиляторами з тиристорним управлінням загальною продуктивністю від 51000 до 228000 м^3/год., двома теплогенераторними установками з максимальною тепловою продуктивністю кожної 754200 кДж/год. і подачею повітря 14000 м^3/год.

Збуренням є ділянка випадкового процесу тривалістю 100 годин у лютому місяці 2004 року з математичним сподіванням –3,98 °С і кореляційною функцією

$$R_0(\tau) = 3{,}755e^{-0{,}03985|\tau|}\cos(0{,}1571\tau) \qquad (7)$$

Окрім цього, для розрахунку раціонального управління слід мати залежності несучості курей та споживання корму від температури, а також залежність потужності привода витяжних вентиляторів від кратності повітрообміну пташника. Такі залежності одержані в результаті наших попередніх досліджень (рис. 1, 2, 3).

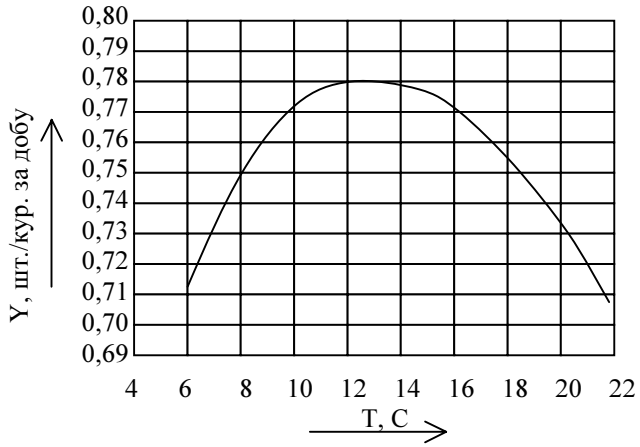


Рисунок 1 – Залежність несучості птиці від температури в пташнику

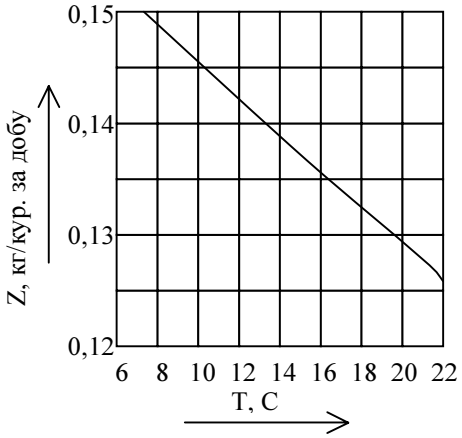


Рисунок 2 – Залежність споживання корму від температури в пташнику

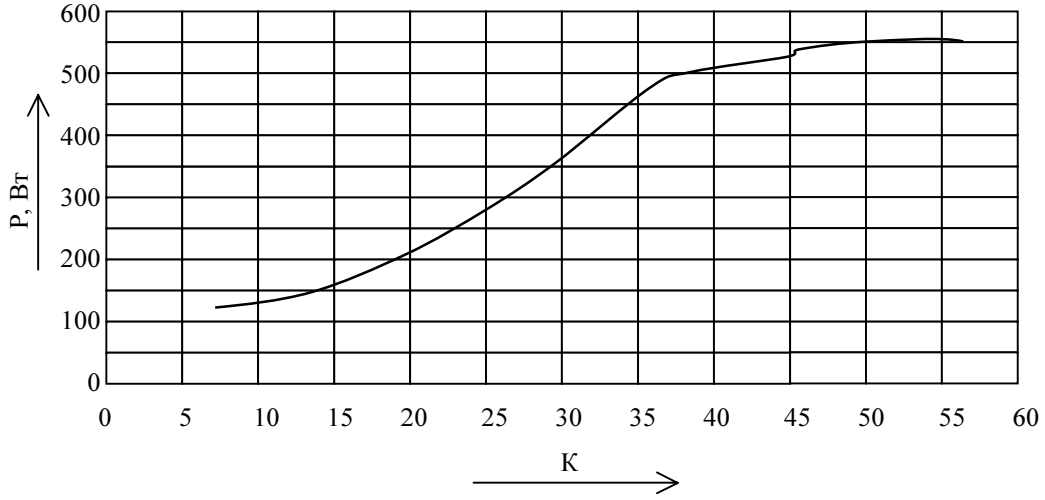


Рисунок 3 – Залежність між потужністю приводу витяжних вентиляторів і кратністю K повітрообміну в пташнику

У розрахунках ефективності управління приймалось, що вартість одного яйця 29 коп., кормів – 1,40 грн. за 1 кг, електроенергії – 28 коп. / кВт · год.

Згідно з [3] формуючий фільтр має передаточну функцію

$$W_{ф}(s) = \frac{1{,}92s + 0{,}3}{40{,}26s^2 + 3{,}2s + 1}. \qquad (8)$$

Диференціальне рівняння технічного об'єкта має вигляд

$$\frac{4890}{1{,}217\Delta V + 1858}\frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) = \frac{34076}{1{,}217\Delta V + 1858}\theta_{нагр}(t) +$$
$$+\left(\frac{1{,}217\Delta V' + 1858}{1{,}217\Delta V + 1858} - \frac{1858e^{-0{,}032t}}{1{,}217\Delta V + 1858}\right)\theta_{зовн}(t) + \frac{116000}{1{,}217\Delta V + 1858}, \qquad (9)$$

де ΔV – загальний повітрообмін (5100 ... 228000) м^3/год.;

$\Delta V'$ – повітрообмін через витяжну вентиляцію (23000 ... 228000) м^3/год.;

$\theta_{нагр}(t)$ і $\theta_{зовн}(t)$ – температура повітря відповідно від нагрівників і зовнішня.

Таким чином, постійна часу технічного об'єкта буде змінюватись у межах від 0,0175 до 0,0766 год., що на 2...3 порядки нижче, ніж постійна часу формуючого фільтра.

Для визначення інтенсивностей переходу із зони в зону потрібно в середовищі Matlab Simulink пропустити білий шум через формуючий фільтр, після чого отриманий сигнал треба пропустити через технічний об'єкт без зворотного зв'язку з вибором потужностей регулюючих органів таким чином, щоб математичне сподівання реалізації випадкового процесу температури співпадало з оптимальною температурою утримання курей-несучок з врахуванням їх тепловиділення (рис. 4), а якщо це не можливо потужності мають мати граничні значення.

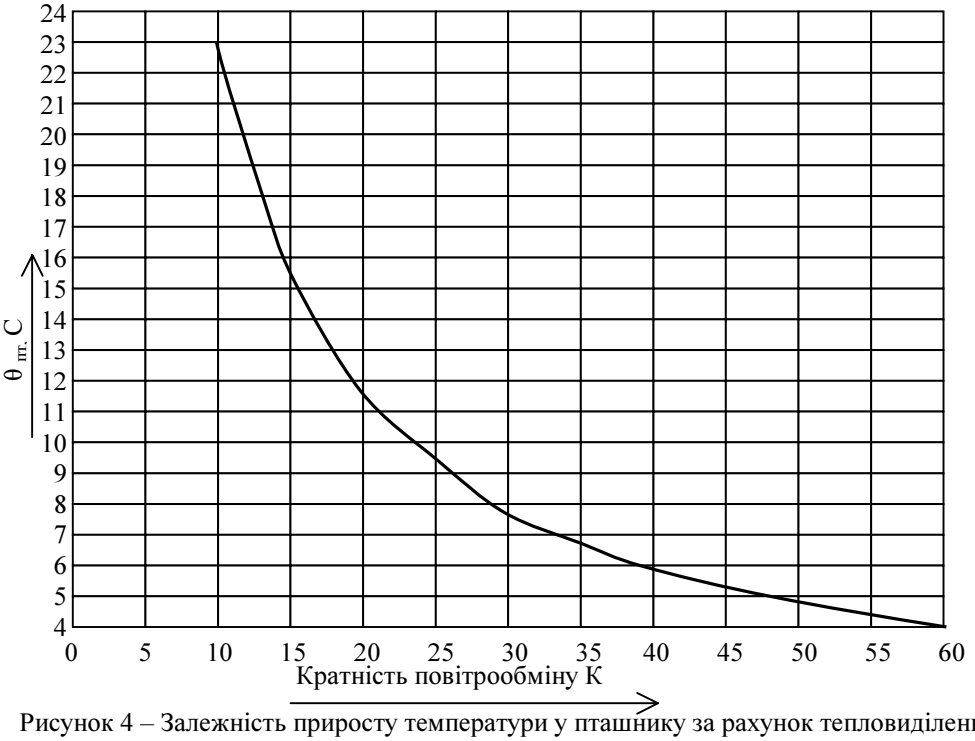


Рисунок 4 – Залежність приросту температури у пташнику за рахунок тепловиділення птиці від кратності повітрообміну

За отриманою реалізацією інтенсивності переходів становлять [6]:

з комфортної зони в зону з нижчою температурою $\lambda_1 = 0{,}294$,

з комфортної зони в зону з вищою температурою $\lambda_2 = 0{,}245$,

із зони з нижчою температурою в комфортну зону $\lambda_3 = 0{,}039$,

із зони з вищою температурою в комфортну зону $\lambda_4 = 0{,}118$.

Відповідно середні тривалості перебування у зонах будуть:

у зоні з вищою температурою $T_в = \frac{1}{\lambda_4} = 8{,}5$ год.,

у зоні з нижчою температурою $T_н = \frac{1}{\lambda_3} = 25{,}6$ год.,

у комфортній зоні $T_к = 100 - (T_в + T_н) = 65{,}9$ год.

Порівнювалось також три різні способи управління:

а) стабілізація параметра на рівні 13 °С;

б) компенсація відхилень, які сягали за комфортну зону;

в) утримання повітрообміну на мінімальному рівні.

Порівняння перших двох способів показало, що за відсутності втрат за спожиті корми і від несучості в обох випадках енергетичні затрати у варіанті б зменшились на 27%. Третій спосіб виявився найбільш економічним, бо втрати від несучості компенсувались зменшенням затрат на корми, а енергетичні затрати зменшились на 60 %.

Аналізуючи графіки залежності несучості та витрат кормів, а також зміну температури від тепловиділення птиці, можна зробити висновок, що у досить значному діапазоні зовнішніх температур втрати від зменшення несучості компенсуються економією кормів. Залежності на рис. 5 показують, що у діапазоні зовнішніх температур від –6 до +4 °С взагалі варто утримувати повітрообмін на мінімальному рівні.

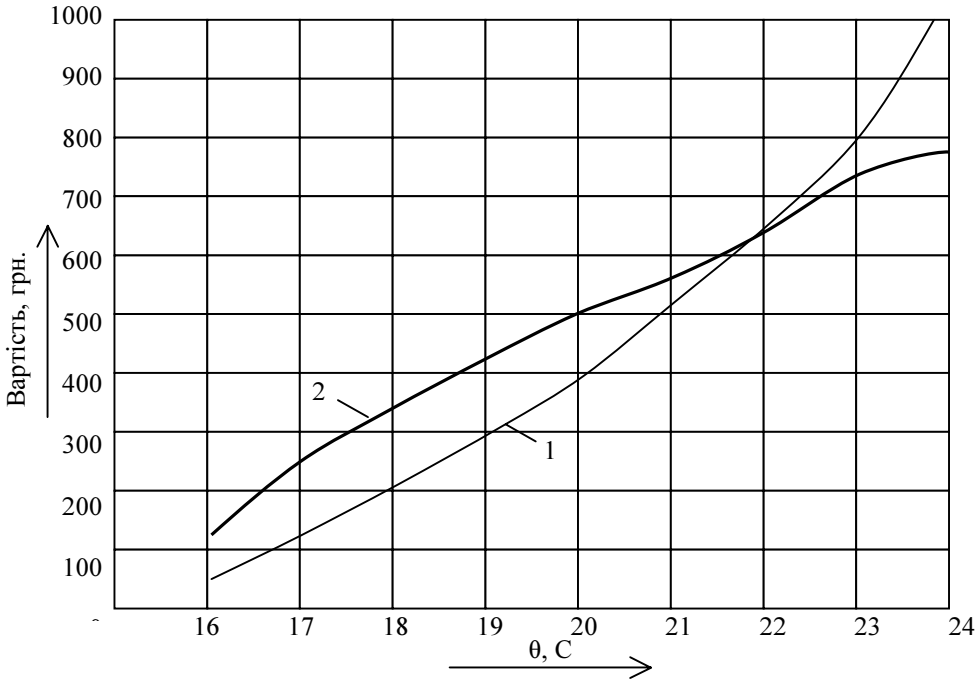


Рисунок 5 – Залежності втрат несучості (1) і зниження витрат на годівлю (2) від температури у технічному об'єкті управління

Аналогічно будуються алгоритми управління для інших видів можливих збурень.

Загальний ефект від застосування раціональних алгоритмів управління процесом утримання курей-несучок, побудований за наведеною методикою, призведе до зменшення енергетичних витрат у середньому на (30 ... 40)% у порівнянні з режимами стабілізації.

Список літератури

1. Слоним А.Д. Физиология терморегуляции и термической адаптации у сельскохозяйственных животных. – М.-Л., Наука, 1966. – 148 с.
2. Шилов И.А. Регуляция теплообмена у птиц. – М.: Издательство Московского университета, 1968. – 252 с.
3. Пугачев В.С., Синицын И.Н. Стохастические дифференциальные системы. М.:, Наука, 1985. – 560 с.
4. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
5. Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1985, – 324 с.
6. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.

УДК 621.771.23.024.2

Ю.Б. Беляев, проф., д-р техн. наук, Г.Г. Грабовский, проф., д-р техн. наук,
Н.Г. Иевлев, ст. научн. сотр., канд. техн. наук, В.Б. Корбут, А.В. Ушаков
Научно-производственное предприятие «Киевский институт автоматики»

Автоматизированная компьютерно-интегрированная технология и система гидросбива окалины с поверхностей горячего металла

В статье приведен опыт разработки, результаты опытно-промышленной эксплуатации и гидродинамических исследований новой отечественной высокоэффективной энерго- и ресурсосберегающей технологии, реализуемой автоматизированной системой удаления окалины высоконапорным водоструйным инструментом с плоских поверхностей стальных горячих слитков в потоке перед их прокаткой.

энерго- и ресурсосбережение, автоматизация технологических процессов, компьютерно-интегрированная система управления, гидромеханическая очистка от окалины поверхностей горячего металла, водоструйное оборудование, гидравлическая сеть, насосные агрегаты высокого давления воды, роторные сопловые головки, перепускной клапан - байпас

В соответствии с планом выполнения инновационного проекта, утверждённого КМ Украины, по заданию ОАО «Алчевский металлургический комбинат» НПП «Киевский институт автоматики»» при участии НПП «ИНДРИС» в 2002-2004 гг. разработал, изготовил, наладил, исследовал и ввёл в промышленную эксплуатацию на толстолистовом стане «2800» горячей прокатки первую современную «Автоматизированную систему гидросбива окалины («АС ГСО)» [1] высоконапорным оборудованием со вспомогательной системой подготовки воды низкого давления, группой управляемых насосных агрегатов высокого давления, подсоединённых в общую сеть и питающих через коллектор водоструйные инструменты - роторные сопловые головки рабочего органа – вдвижного устройства гидросбива окалины, размещённого в камере на технологической линии прокатки. К коллектору высокого давления воды также подключён перепускной клапан–байпас переключения режимов работы гидросистемы.

Автоматизированное управление оборудованием гидросбива осуществляется системой [2] с помощью датчиков, размещённых на технологической линии прокатного стана, микропроцессорных контроллеров и промышленной ПЭВМ.

Отличительной особенностью нового автоматизированного технологического процесса очистки горячих слитков от окалины перед прокаткой, отличающего его от существующих устройств и систем, является активная информационная взаимосвязь АС ГСО с АСУ ТП участка нагревательных (методических) печей [3], а также оригинальные конструкции оборудования и инструментов высокого давления воды [4].

Комплекс «АС ГСО – АСУ ТП печами» позволяет не только оперативно обмениваться данными о параметрах нагреваемых в печах слитков (размеры, температура, марка стали), но и оптимизировать технологический режим нагрева следующих партий слитков с учётом степени охлаждения предыдущих водоструйным инструментом, дополнительно экономя тем самым топливо (природный газ), используемое в методических печах, и уменьшая угар металла в процессе пребывания слитков в печах.

© Ю.Б. Беляев, Г.Г. Грабовский, Н.Г. Иевлев, В.Б. Корбут, А.В. Ушаков. 2004

Экономические показатели и источники эффективности эксплуатации компьютерно- интегрированного комплекса «АС ГСО – АСУ ТП печами» за счёт энерго- и ресурсосбережения приведены в таблице 1.

Таблица 1

№№ п/п	Показатели	Оценка экономии	Технические источники эффективности
1.	Улучшение качества поверхности, повышение сортности проката	Увеличение доли кондиционной продукции за счёт снижения числа дефектных мест и затрат на их зачистку	• Увеличение с 8,5 - 20 МПа (в аналогах) давления воды до 60 – 70 МПа (в АС ГСО). • Новые конструкции сопел уменьшенного сечения водоструйных инструментов. • Автоматическая оптимизация режимов работы насосов высокого давления воды.
2.	Расход воды	Уменьшение в 10…20 раз по сравнению с существующими системами и устройствами гидросбива окалины	• Реактивное вращение (со скоростью до 1500 об/мин) роторных сопловых головок. • Автоматический выбор оптимального расстояния от сопел роторных головок до поверхностей горячего металла. • Конфигурация, размеры, количество сопел в роторных головках.
3.	Расход электро-энергии	Уменьшение в 5…10 раз по сравнению с существующими системами и устройствами гидросбива окалины	• Отечественное насосное оборудование меньшей, по сравнению с аналогами, установленной мощности. • Автоматический ввод «холостого» режима с потреблением 7% установленной мощности и уменьшение расхода воды при отсутствии горячего слитка в зоне действия гидросбива.
4.	Ресурсо-сбережение оборудо-вания	Увеличение срока службы агрегатов и исполнительных механизмов прокатного стана	• Снижение затрат на ремонт и оптимизация технологического процесса. • Работа гидросбива в режимах: «напряжённый рабочий - щадящий «холостой» при наличии или отсутствии металла в зоне очистки слитков, а также регулирование расхода воды.
5.	Расход топлива в печах	Уменьшение на 2,14 %	• Уменьшение степени охлаждения горячих слитков, благодаря уменьшению регулируемого системой расхода воды.
6.	Угар металла в печах	Меньше на 3,5 кг/тонну	• Экономия топлива за счёт уменьшения образования окалины при длительном нагреве слитков в печах.
7.	Стоимость АС ГСО	Меньше в 2 – 3 раза по сравнению с зарубеж. аналогами	• За счёт меньшей стоимости инжиниринга и отечественного оборудования.
8.	Расчётный годовой экономический эффект	3…4 млн. грн.	• Эффект от внедрения АС ГСО зависит от технико-экономических показателей конкретного прокатного стана и предъявляемых к Системе требований.

Улучшение качества поверхностей очищаемых от окалины слитков перед их прокаткой при эксплуатации АС ГСО достигается за счёт работы, совершаемой струями воды, истекающими под высоким давлением из сопел роторных головок устройства гидросбива. Они создают гидромеханический удар и паро-взрывной эффект, в результате чего окалина взламывается, измельчается, отделяется от основного металла и удаляется с поверхности каждого слитка, проходящего через камеру гидросбива при движении по рольгангу технологической линии от печей к клетям прокатного стана.

Значительная экономия электроэнергии, воды и материальных ресурсов достигается автоматически оптимальным управлением сменой режимов работы группы насосных агрегатов: напряжённого «рабочего» - при номинальном сверхвысоком давлении воды (во время прохождения слитка через камеру гидросбива) и щадящего «холостого» - при существенно пониженном давлении (при отсутствии слитка в камере гидросбива).

Экономия материальных и трудовых ресурсов достигается также за счёт существенного сокращения (вплоть до исключения) времени и труда рабочего персонала стана на участке ручной зачистки листов от вкатанной окалины абразивными инструментами.

В состав гидравлической части АС ГСО входит:

- система подготовки воды низкого давления;
- водоструйное оборудование высокого давления;

Принципиальная гидравлическая схема оборудования водоструйного высокого давления (ОВВД) приведена на рис. 1.

В состав ОВВД входят следующие компоненты:

- группа электроприводных кривошипно-шатунных горизонтальных плунжерных насосных агрегатов высокого давления воды (63 МПа), входы которых подсоединены к подпитывающим центробежным насосам низкого давления системы подготовки воды, а выходы - к общей сети (коллектору высокого давления и далее – к потребителям: роторным сопловым головкам и байпасу);
- электроуправляемый пневмогидравлический перепускной клапан-байпас с помощью микроконтроллерного устройства управления гидросбивом окалины осуществляет перевод режимов из рабочего в «холостой» и обратно;
- устройство гидросбива окалины (УГСО) - вдвижной модуль на тележке (рис. 2) - размещено в камере на технологической линии прокатки.

УГСО содержит нижнюю (установленную стационарно) и верхнюю (автоматически позиционируемую в зависимости от толщины слитка) траверсы с коллекторами, оснащёнными группами самовращающихся реактивных роторных сопловых головок, которые за счёт кинетической энергии водяных струй, истекающих под давлением более 50 МПа, и паро-взрывного эффекта удаляют окалину, шлаки и другие включения с плоских поверхностей слябов, движущихся через камеру гидросбива.

В период ходовых испытаний ОВВД, ввода в действие и опытно-промышленной эксплуатации АС ГСО на объекте возникали аварийные ситуации в насосах высокого давления, байпасе, роторных головках и элементах их защиты от попадания окалины.

Для выявления причин выхода из строя гидравлической части АС ГСО и последующей разработки системы диагностики работоспособного состояния оборудования были доработаны конструкции отдельных узлов и первоначальная монтажная схема трубных разводок, а также проведены гидродинамические исследования насосных агрегатов с целью обеспечения их живучести и ресурсной

надёжности в условиях круглосуточной эксплуатации системы в частых переходных режимах (рабочий–«холостой»).

Показатели полученных результатов проведенных исследований иллюстрируется осциллограммой работы на общую сеть группы четырёх насосных агрегатов высокого давления (НАВД), приведенной на рис. 3.

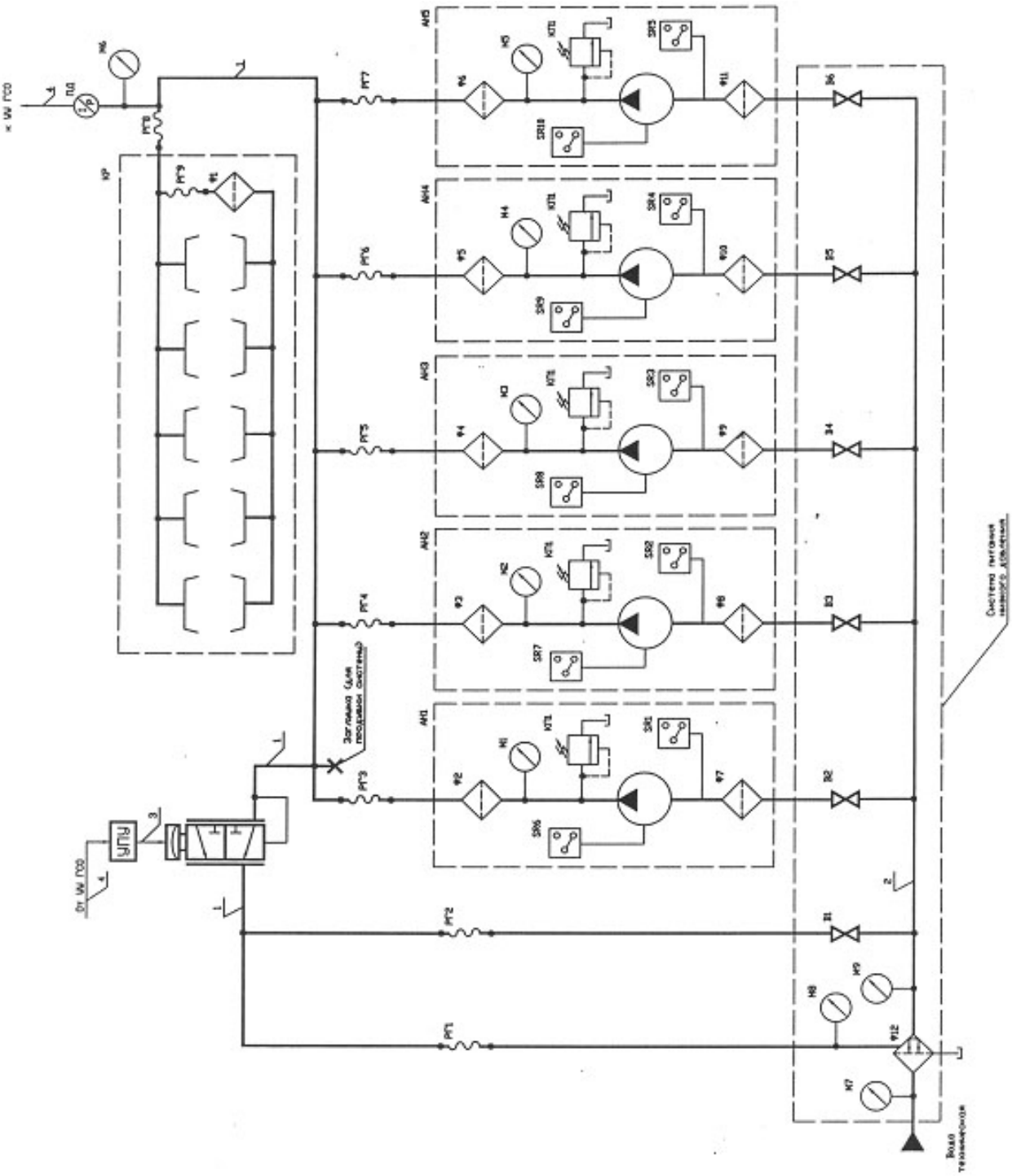


Рисунок 1 – Оборудование водоструйное высокого давления.
Схема гидравлическая принципиальная.

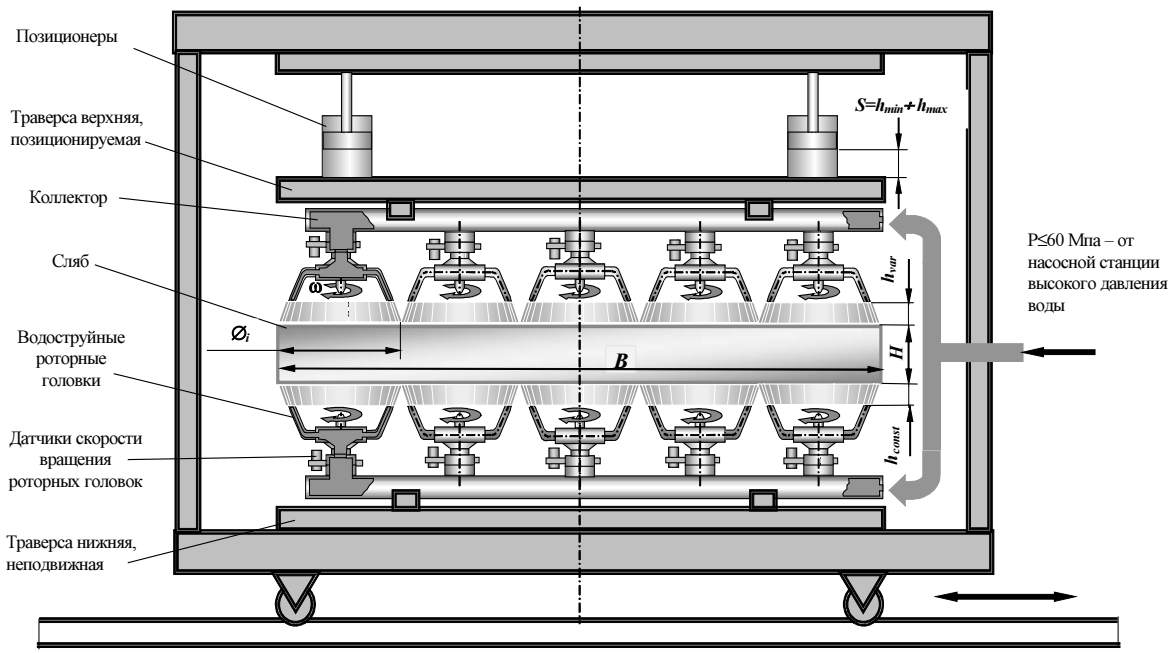


Рисунок 2 - Устройство гидросбива окалины (УГСО).
Фронтальный вид

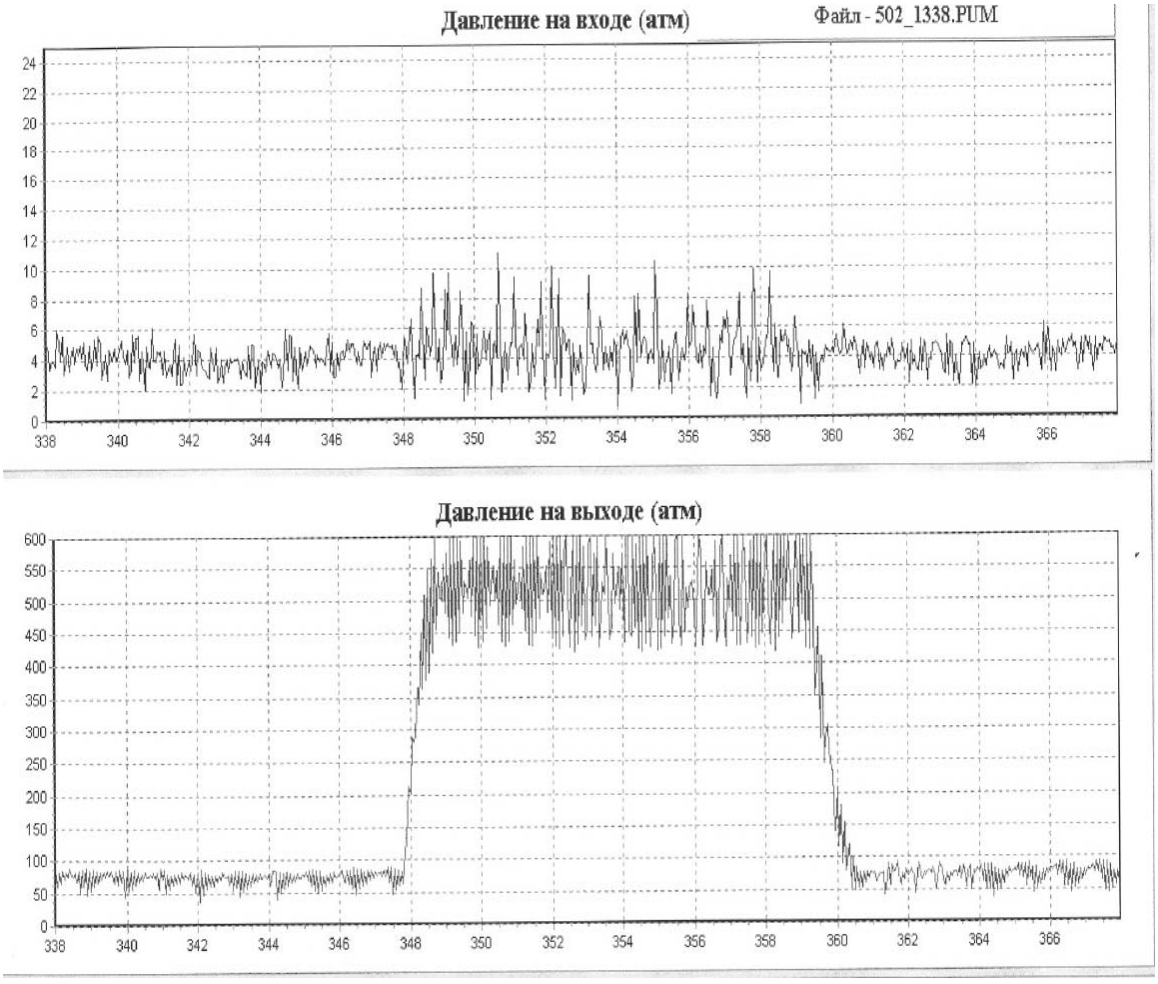


Рисунок 3 - Осциллограмма работы группы насосных агрегатов высокого давления

Анализ вышеприведенных осциллограмм, полученных в переходных режимах («холостой» - рабочий – «холостой) показал следующее.

1. Подпитывающие центробежные насосы [5] системы подготовки низкого давления подают на входы НАВД воду не ламинарным потоком [6], а произвольным турбулентным с пульсациями давления: при «холостом» режиме 0,2 – 0,6 МПа, при рабочем - 0,1 - 1,1 МПа, что превосходит заданное номинальное значение (от 0,15 до 0,6 МПа).

На выходе же НАВД эти пульсации усиливаются, добавляясь и накладываясь на собственные пульсации высокого давления, характерные для данной конструкции насосов [7], в результате чего в общую сеть (коллектор) подаётся турбулентный поток воды с высокочастотными пульсациями давления: при «холостом» режиме 5 - 7 МПа, при рабочем – от 43 МПа до давления, значительно превосходящего заданное номинальное значение (63 МПа).

В результате в коллекторе высокого давления воды происходят динамические процессы, приводящие к гидравлическим ударам и кавитационным явлениям [8], ускоряющим разрушение деталей насосов (блоков цилиндров, плунжеров, нагнетательных клапанов, пружин и др.), датчиков давления, сокращению сроков службы и аварийным ситуациям.

2. От вибрации НАВД и при переходных режимах «рабочий – «холостой» происходят акустические процессы и в сети (общем коллекторе) возникают динамические процессы, приводящие к ударным нагрузкам, воздействующим на не полностью перекрываемые нагнетательные клапаны насосов высокого давления и разрушают их [9].

Принимая во внимание круглосуточную работу АС ГСО, частую смену режимов перевода насосных агрегатов из рабочего в «холостой» и обратно, компоненты ОВВД подвержены комплексным воздействиям пульсирующих и ударных гидродинамических и акустических нагрузок, что приводит к недопустимым аварийным ситуациям и выходу из строя основного энергосилового гидравлического оборудования.

Выводы и рекомендации

1. Учитывая вышеизложенное, необходимо усовершенствовать действующее ВОВД, а также при создании следующих АС ГСО для других аналогичных объектов выбирать более устойчивое к динамическим нагрузкам гидравлическое оборудование, осуществлять оптимальный монтаж трубных разводок, разработать рациональную гидравлическую схему ВОВД, объединённую с системой подготовки воды низкого давления.
2. С целью снижения турбулентности и пульсаций потока воды, подводимой к всасывающим патрубкам насосных агрегатов высокого давления с учётом их паспортных характеристик, необходимо в гидравлической трассе между питающими центробежными насосами системы подготовки воды низкого давления и насосными агрегатами авсокого давления установить демпферы - гасители пульсаций, например, пневмогидравлические аккумуляторы.
3. Для повышения эксплуатационной надёжности водоструйного оборудования высокого давления воды в условиях прокатного производства при воздействии разрушительных гидродинамических и акустических нагрузок необходимо усовершенствовать схему трубных разводок нагнетательного звена высокого давления воды от насосных агрегатов до потребителей (роторных сопловых головок и перепускного клапана-байпаса), а также изменить принципиальную схему подвода воды к устройству гидросбива окалины.

Список литературы

1. Байкалов В.А., Грабовский Г.Г., Шевченко Т.Г. Повышение эффективности и экономичности системы гидросбива окалины на основе опыта очистки печной окалины водоструйной установкой давлением до 700 бар\\Металлы и литьё Украины.–2001.- №10-11.–с. 47–49.
2. Беляев Ю.Б., Грабовский Г.Г., Шевченко Т.Г. Автоматизация гидравлического удаления окалины при прокатке горячего металла.\\Автоматизація виробничих процесів.–2002.-№2 (15).–с. 74–83.
3. Грабовский Г.Г., Шевченко Т.Г., Бойчук Б.И. Базовая система управления нагревательными печами на толстолистовом стане\\Металлы и литьё Украины.–2001. - №1-2.–с. 40–42.
4. Грабовский Г.Г, Иевлев Н.Г., Беляев Ю.Б., Байкалов В.А., Шевченко Т.Г. Автоматизированная энерго- и ресурсосберегающая система гидромеханической очистки от окалины поверхностей горячего метала на прокатних станах.\\Промислова гідравліка і пневматика.-2004.-“1 (3).-с. 14-16.
5. Копылов В.И., Яхно О.М. Насосы и вентиляторы.–Киев.:НТУУ–1996.–328 с.
6. Чиняев И.А. Поршневые кривошипные насосы.–Л.:Машиностроение, Ленин-градское отделение.–1983.–176 с.
7. Пономаренко Ю.Ф. Насосы и насосные станции механизированных крепей.-М.:Недра-1983.-184 с.
8. Федоткин И.М. и др. Математическое моделирование технологических процессов. Гидромеханические процессы.- Київ: Техніка.–2002.–408 с.
9. Полянов В.В., Скворцов Л.С. Насосы и вентиляторы–М.:Стройиздат-1990-336 с.

УДК 629.7.07

Ю.В. Сікірда, канд. техн. наук, Т.Ф. Шмельова, доц., канд. техн. наук
Державна льотна академія України
І.І. Єніна, канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Формування структури інформаційного забезпечення системи підтримки прийняття рішень авіадиспетчера в позаштатних польотних ситуаціях

У статті представлено структуру підсистем отримання і збереження інформації щодо повітряного судна і зони управління повітряним рухом системи підтримки прийняття рішень авіадиспетчера, призначеної для визначення оптимального варіанта завершення польоту в позаштатних ситуаціях, що потребують виконання вимушеної посадки літака.
статична та динамічна інформація, система збору інформації, ієрархічна структура даних

Позаштатні польотні ситуації, що потребують вимушеної посадки повітряного судна (ПС), поряд із жорстким лімітом часу на прийняття рішення і напруженим психофізіологічним станом авіаційного оператора характеризуються високим рівнем неповноти й невизначеності інформації. Тому в подібних умовах прийняття своєчасного коректного рішення щодо оптимального варіанта завершення польоту доцільно покласти на систему підтримки прийняття рішень (СППР).

У статті наводиться розроблена для СППР авіадиспетчера в позаштатних польотних ситуаціях структура підсистем отримання і збереження інформації щодо ПС і зони управління повітряним рухом (УПР). При її створенні враховувались основні вимоги, що ставляться до *інформаційного забезпечення* системи [1]: принципи методологічної єдності, інформаційної сумісності, інтеграції обробки даних, гнучкості структури та можливості отримання необхідної інформації без посередників.

Визначення інформації, необхідної для вибору оптимальної альтернативи завершення польоту

Вибір оптимальної альтернативи завершення польоту в позаштатних ситуаціях, що потребують вимушеної посадки ПС, пов’язаний з необхідною інформацією, яку можна розділити на дві категорії: *статичну* та *динамічну* (оперативну).

До *статичних даних щодо ПС* відносяться отримані з попередньо оформленого й поданого до служби руху плану польоту планові дані: тип ПС; мінімум командира ПС для посадки; та залежні від типу ПС його тактико-технічні характеристики: кількість, тип та розташування двигунів; горизонтальні й вертикальні швидкості за етапами та висотами польоту; максимальний кут крену; аеродинамічна якість; нормативна посадкова маса ПС; мінімум ПС для посадки; допустимий для посадки стан злітно-посадкової смуги (ЗПС); необхідна для посадки довжина ЗПС в стандартних умовах; допустимі складові вітру для посадки.

Оперативна інформація щодо ПС включає моніторингові дані, які отримують в процесі безпосереднього спостереження за ПС: тип ситуації; стан ПС; висота ПС; координати ПС; курс польоту ПС; фактична посадкова маса ПС.

© Ю.В. Сікірда, Т.Ф. Шмельова, І.І. Єніна. 2004

До *статичної інформації щодо аеродромів* відносяться наступні дані: координати аеродрому; висота аеродрому; мінімум аеродрому; кількість ЗПС; тип ЗПС (штучна або ґрунтова); довжина ЗПС; посадковий шляховий кут ЗПС; нахил ЗПС.

До оперативної інформації щодо аеродромів відносяться:

- стан ЗПС (наявність ремонтних робіт, час звільнення ЗПС, коефіцієнт зчеплення, наявність снігу, сльоти, води, льоду, вологість і міцність ґрунту, міцність снігу);
- стан радіотехнічних засобів посадки (працездатність або непрацездатність);
- метеорологічні умови на аеродромі (небезпечні явища погоди, хмарність і видимість, напрямок і сила вітру, фактична температура).

До *статичної інформації щодо місцевості* відносяться: тип майданчика для посадки; координати майданчика; наявність перешкод і населених пунктів; тип підстилаючої поверхні.

До *оперативної інформації щодо місцевості* відносяться метеорологічні дані: небезпечні явища погоди, хмарність і видимість, напрямок і сила вітру.

Розробка структури системи збору інформації, необхідної для вибору оптимальної альтернативи завершення польоту

Засоби отримання інформації щодо об'єкта управління (ПС) (рисунок 1, а) і зони УПР (рисунок 1, б) в СППР авіадиспетчера в позаштатних польотних ситуаціях залежать від ступеня автоматизації диспетчерських пунктів і бортового обладнання ПС.

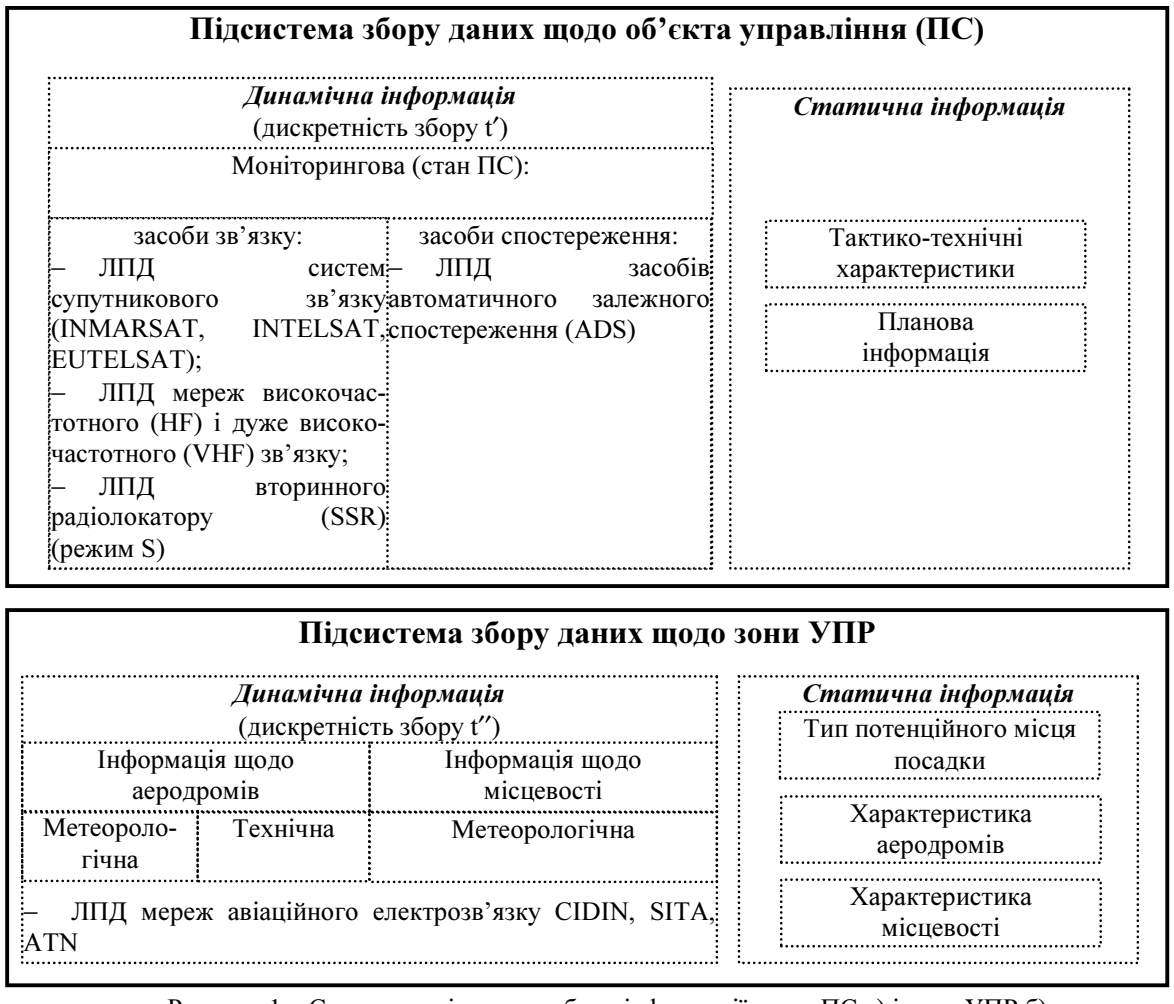


Рисунок 1 – Структура підсистем збору інформації щодо ПС а) і зони УПР б)

Статична інформація щодо ПС вводиться до початку роботи системи і зберігається в базі даних “Тактико-технічні характеристики ПС”. Аналогічно *статична інформація щодо зони УПР* попередньо заноситься до баз даних „Тип потенційного місця посадки”, “”Характеристика аеродромів” і “Характеристика місцевості”.

Передана через телеграфну авіаційну фіксовану мережу електрозв’язку AFTN *планова інформація щодо ПС* вводиться в систему з автоматизованого робочого місця асистентом-оператором або поступає в систему по лініям передачі даних (ЛПД) авіаційних мереж електрозв’язку CIDIN, SITA, ATN до початку обслуговування певного польоту.

Динамічна інформація щодо аеродромів і місцевості в зоні управління збирається по ЛПД авіаційних мереж електрозв’язку CIDIN, SITA, ATN в моменти часу t′.

Моніторингова інформація щодо ПС збирається через засоби зв’язку і спостереження також дискретно в моменти часу t″.

В рамках концепції CNS/ATM припускається, що зв’язок з ПС буде представляти собою в основному обмін цифровими даними. Передача даних між автоматизованими бортовими й наземними системами може проходити навіть без втручання пілота або авіадиспетчера [2].

За допомогою *засобів зв’язку* можна отримати моніторингову інформацію щодо типу ситуації на ПС, стану ПС, рішення командира ПС щодо можливості подальшого продовження польоту і режиму зниження у випадку вимушеної посадки, інформацію щодо фактичної посадкової маси для підбору місця посадки, а також координати, барометричну висоту і напрямок польоту ПС при відсутності наземної системи незалежного спостереження.

Зв’язок з ПС можливий за допомогою наступних *радіоліній*:

1. Супутникових систем зв’язку, які забезпечують аналогові й цифрові канали зв’язку (Міжнародна організація рухомого супутникового зв’язку INMARSAT, Міжнародна організація супутникового зв’язку INTELSAT та система для поліпшення зв’язку між країнами акваторій Чорного та Каспійського моря на основі супутників EUTELSAT, яка є найбільш економічно вигідною).
2. Дуже високочастотних (VHF) ліній аналогового й цифрового (у режимі VDL) зв’язку.
3. Високочастотних (HF) ліній аналогового й цифрового зв’язку.
4. Ліній передачі даних режиму S вторинного радіолокатору (SSR).

Спостереження на основі *первинного радіолокатора* (PSR) надає інформацію щодо полярних координат ПС (азимуту і дальності), напрямку польоту ПС і виникнення позаштатної ситуації на борту ПС (при включенні екіпажем ПС сигналу “Лихо” апаратури розпізнавання). *Вторинний радіолокатор* при роботі прийомовідповідача ПС в режимі А надає інформацію щодо розпізнавального індексу, азимуту і дальності ПС, курсу польоту ПС, виникнення певної позаштатної ситуації (при включенні екіпажем ПС сигналу “Аварія” прийомовідповідача), в режимі С – щодо барометричної висоти ПС. Режим S дозволяє підвищити ефективність SSR за рахунок використання однозначної адреси кожного ПС, але дані засоби спостереження забезпечують тільки аналогові канали зв’язку.

Автоматичне залежне спостереження (ADS) полягає в автоматичній передачі по ЛПД повітряним судном інформації, яка видається бортовими навігаційними системами. Як мінімум ця інформація містить дані щодо місцеположення ПС у просторі та часі, але може вміщати також додаткові дані, наприклад, про виникнення позаштатної ситуації на борту ПС.

Розробка структури даних, необхідних для вибору оптимальної альтернативи завершення польоту

Великий об’єм різнопланової статичної і динамічної інформації, необхідної для прийняття рішення щодо оптимальної альтернативи завершення польоту, потребує певної систематизації. Зручною для збереження та використання даних в СППР авіадиспетчера в позаштатних польотних ситуаціях є *ієрархічна структура об’єктів* [3, 4]. Представимо визначені раніше необхідні дані щодо ПС і зони УПР у вигляді ієрархічної структури (рисунки 2, 3).

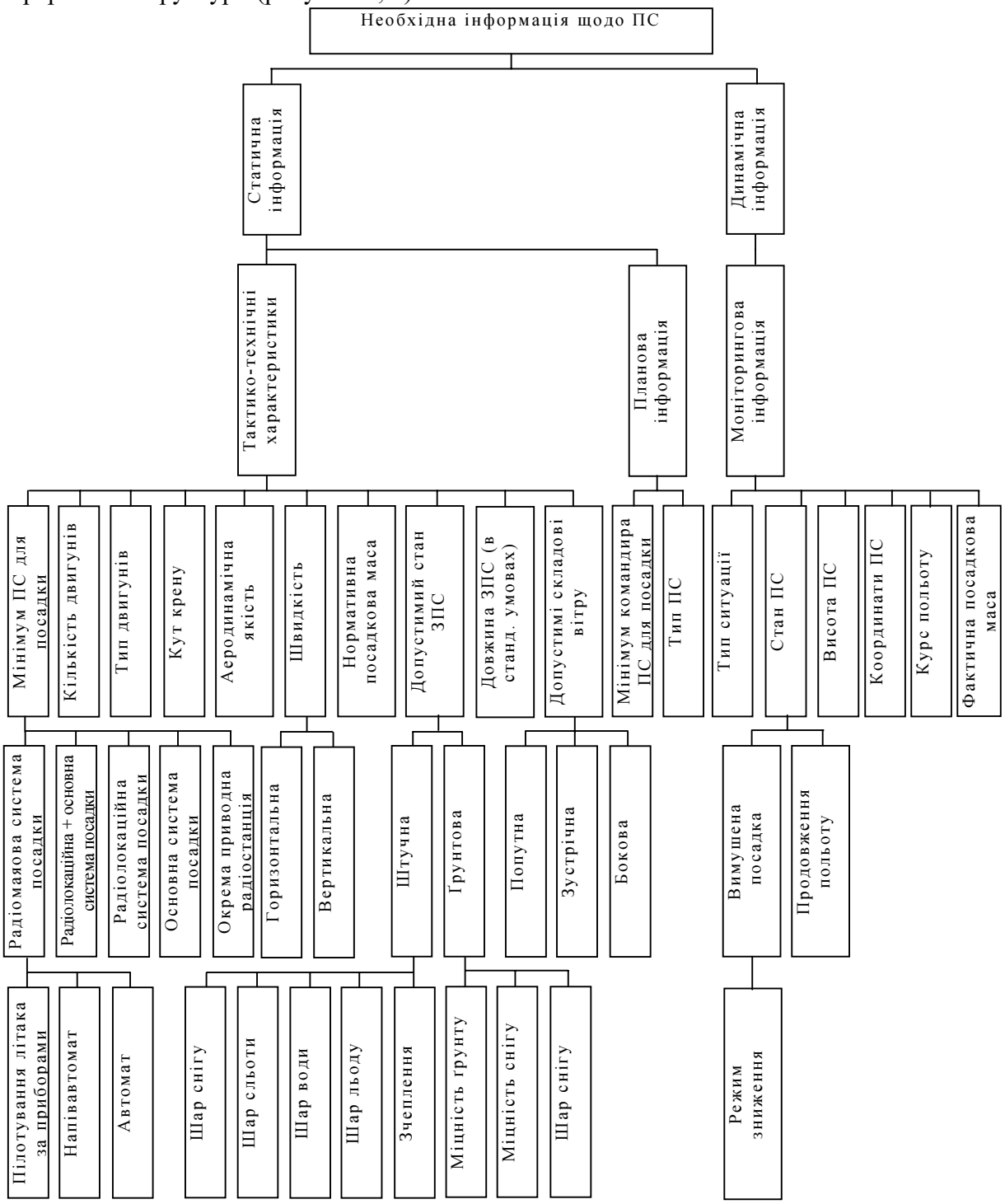


Рисунок 2 – Ієрархічна схема упорядкування інформації щодо ПС, необхідної для вибору оптимального варіанта завершення польоту

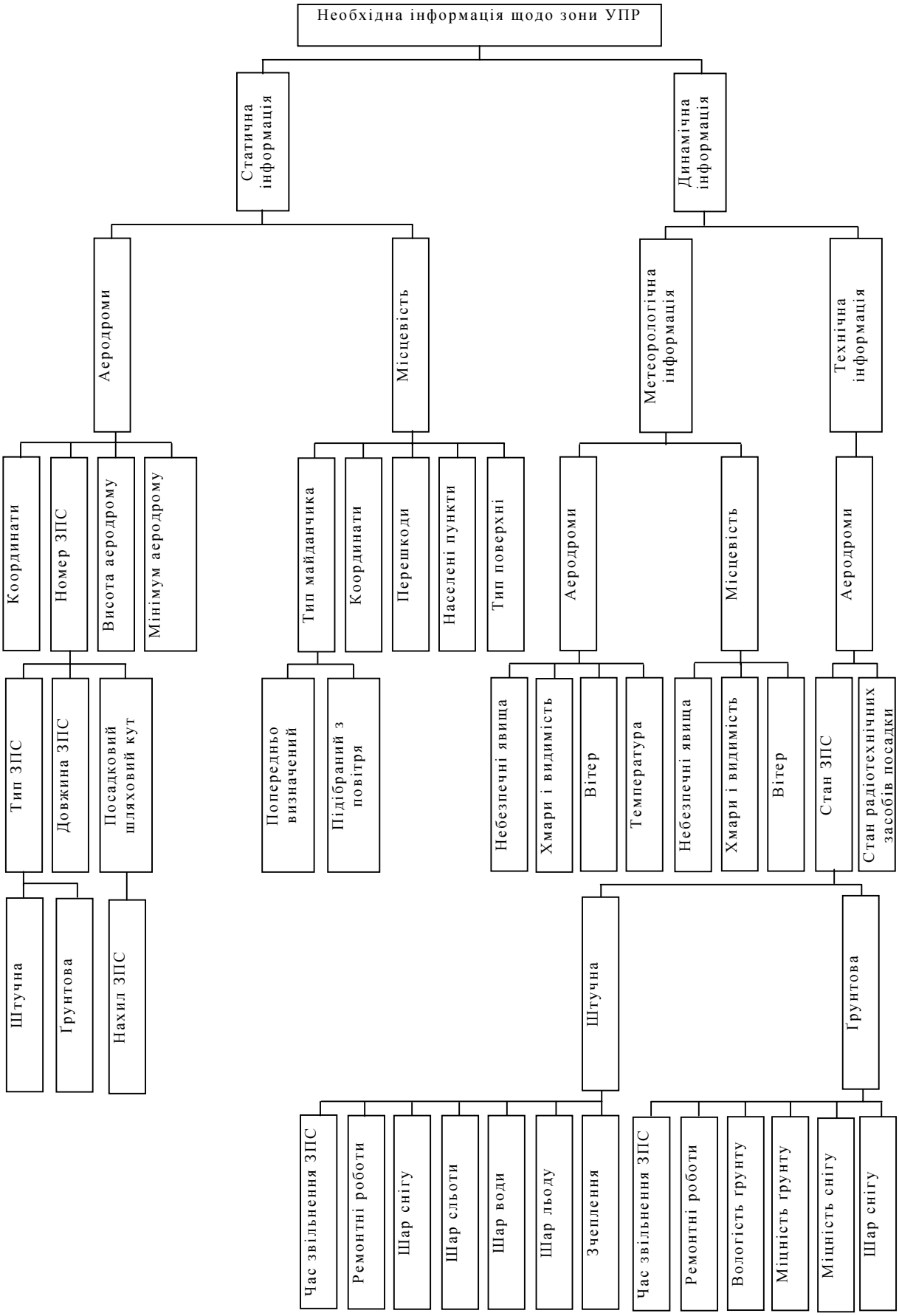


Рисунок 3 – Ієрархічна схема упорядкування інформації щодо зони УПР, необхідної для вибору оптимального варіанта завершення польоту

Висновки

Ієрархічне упорядкування даних щодо ПС і зони УПР дозволило створити програмне забезпечення СППР авіадиспетчера в позаштатних польотних ситуаціях, що потребують виконання вимушеної посадки літака, за об'єктно-орієнтованою технологією на основі візуальної системи програмування Delphi 5.

Визначена структура підсистем отримання і збереження інформації лягла в основу реалізованого в тренажерній системі для підготовки спеціалістів з обслуговування повітряного руху на базі Державної льотної академії України (Харківська учбова зона) прототипу системи інформаційної підтримки авіадиспетчера.

Список літератури

1. Епанешников А.М., Епанешников В.А. Delphi 5. Язык Object Pascal. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 368 с.
2. Глобальный аэронавигационный план применительно к системам CNS/ATM. – Doc. 9750-AN/963. – Монреаль, Канада, 2002. – 325 с.
3. Баас Р., Фервай М., Гюнтер Х. Delphi 5: Для пользователя. Пер. с нем. – К.: Издательская группа BHV, 2000. – 496 с.
4. Архангельский А.Я. Работа с локальными базами данных в Delphi 5. – М.: ЗАО «Издательство БИНОМ», 1999. – 192 с.

УДК 629.7.07

О.В. Артеменко, асп.
Государственная летная академия Украины, г. Кировоград
Р.В. Жесан, доц., канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет
В.М. Симак
Управление обеспечения аэронавигационного обслуживания полетов

Оценивание предполетной информации методами нечетких множеств

В статье изложены проблемы автоматизации предполетной подготовки экипажей воздушного судна и предложены пути решения за счет классификации информации по степени востребованности. Получены количественные оценки значимости предполетной информации с помощью теории нечетких множеств для дальнейшего применения в автоматизированной системе подготовки предполетной информации для целенаправленного оптимального выбора.
информация, теория нечетких множеств, оптимальный выбор

В соответствии с установленными правилами каждому полету воздушного судна должна предшествовать тщательная подготовка, которая подразделяется на предварительную – на начальном этапе подготовки экипажа к выполнению полета, и предполетную – заключительный этап (за 1 ч до вылета). Перед каждым полетом, экипажи воздушного судна (ЭВС) в результате предполетной подготовки должны быть обеспечены всей необходимой аэронавигационной, метеорологической и картографической информацией [1, 2]. При этом пилоту приходится иметь дело с большим объемом информации, что влияет на качество предполетной подготовки за счет увеличения время обработки, что может привести к ошибкам, связанным с неполным или нечетким учетом факторов [3]. Поэтому возникает проблема автоматизации представления информации пользователю-пилоту в процессе предполетной подготовки с классификацией информации по степени востребованности.

В целях оптимизации предполетной подготовки в авиации разрабатываются и применяются автоматизированные системы подготовки предполетной информации (АС ППИ).

Формирование выборочной информации производится ранжированием экспертами-пилотами на этапе проектирования АС ППИ с учетом выявленных приоритетов по степени ее востребованности.

Информация, предоставляемая в целях предполетного планирования на аэродромах, включает [1, 2]:

- элементы объединенного пакета аэронавигационной информации (сборник аэронавигационной информации (AIP), циркуляр аэронавигационной информации (AIC), поправки и дополнения к AIP, извещения для пилотов (NOTAM), бюллетени предполетной информации (PIB), которые часто являются сводкой действующих NOTAM);
- карты и схемы;
- метеорологическая информация.

© О.В. Артеменко, Р.В. Жесан, В.М. Симак. 2004

После анализа документов аэронавигационной информации вся информация, с которой необходимо ознакомиться ЭВС, была разделена в соответствии с заданием на вылет на классы по степени востребованности пользователем-пилотом.

Для формализации качественных оценок важности информации $\bar{I}$, предоставляемой экипажу воздушного судна в процессе предполетной подготовки, был использован аппарат *теории нечетких множеств* [4]. При этом использовался метод, который основан на обработке статистических данных, в котором в качестве степени принадлежности $h \in H$ множеству X принимается оценка частоты использования экспертом нечеткого понятия для характеристики элемента.

В индивидуальном анонимном опросе принимало участие 30 респондентов – пилотов со стажем работы не менее 10 лет с высоким, приблизительно одинаковым, коэффициентом авторитета. Замкнутый опрос, при котором невозможно «давление авторитетом», позволил не учитывать при отборе экспертов их психологические качества (совместимость, коммуникабельность и так далее).

Экспертам предлагалось оценить важность предоставляемой им информации i_i, $i = \overline{1,4}$ необходимой для выполнения полетов по следующей шкале:

1. Обязательная информация i_1 (нужна всегда).
2. Полезная информация i_2 (для анализа аэронавигационной и метеорологической обстановки).
3. Желательная информация i_3 (но можно обойтись без нее).
4. Дополнительная информация i_4 (нужна не всегда или нужна только в конкретных случаях).

Максимально возможная оценка информации принималась равной 100 единицам. Интервал [0; 100] был разбит на 10 отрезков, по каждом из которых подсчитывалось количество экспертов, которые использовали определенное значение лингвистической переменной для выражения своего представления о важности предполетной информации (статистика данных, полученных после проведения опроса, приведена в табл. 1).

Для обработки данных была использована так называемая матрица подсказок, элементы которой вычисляются по формуле:

$$k_j = \sum_{i=1}^{4} b_{ij}\ ,\ j = \overline{1,10} \qquad (1)$$

Таблица 1 – Статистика данных, полученных после проведения опроса

Значения	Интервал, единицы									
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
i_1	0	0	0	0	0	0	2	4	11	13
i_2	0	0	0	0	5	12	7	5	1	0
i_3	0	2	15	5	6	2	0	0	0	0
i_4	13	12	3	2	0	0	0	0	0	0
k_j	13	14	18	7	11	14	9	9	12	13

Матрица подсказок имеет вид:

$$M = \| \ 13 \quad 14 \quad 18 \quad 7 \quad 11 \quad 14 \quad 9 \quad 9 \quad 12 \quad 13 \ \| .$$

В последней строке табл. 1 выбираем максимальный элемент:

$$k_{\max} = \max k_j = \max\{13;14;18;7;11;14;9;9;12;13\} = 18 \qquad (2)$$

Далее все элементы табл. 1 преобразовываем по формуле (3) и заносим в табл. 2:

$$c_{ij} = \frac{b_{ij} k_{\max}}{k_j},\ i = \overline{1,4}\ ,\ j = \overline{1,10} \qquad (3)$$

Таблица 2 – Промежуточные значения для построения функций принадлежности после проведения анкетирования

Значения	Интервал, единицы									
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
i_1	0	0	0	0	0	0	4	8	16,5	18
i_2	0	0	0	0	8,2	15,4	14	10	1,5	0
i_3	0	2,6	15	12,9	9,8	2,6	0	0	0	0
i_4	18	15,4	3	5,1	0	0	0	0	0	0

Для построения функций принадлежности находим максимальные элементы по строкам табл. 2.

$$c_{i\max} = \max_j c_{ij}\ ,\ i = \overline{1,4}\ ,\ j = \overline{1,10;} \qquad (4)$$

$c_{1max} = 18$;
$c_{2max} = 15,4$;
$c_{3max} = 15$;
$c_{4max} = 18$.

Функции принадлежности рассчитываются по формуле (5):

$$\mu_{ij} = \frac{c_{ij}}{c_{i\max}}. \qquad (5)$$

Результаты, полученные после проведения анкетирования, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты, полученные после проведения экспертизы

Значения	Интервал, единицы									
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
i_1	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0,9	1
i_2	0	0	0	0	0,5	1	0,9	0,6	0,1	0
i_3	0	0,2	1	0,9	0,7	0,2	0	0	0	0
i_4	1	0,9	0,2	0,3	0	0	0	0	0	0

Функции принадлежности для каждого значения лингвистической переменной «Важность информации», представлены на рис. 1.

По диаграммам, приведенным на рис. 1, можно определить количественные показатели, которые определяют качественные характеристики важности предполетной информации:

- обязательной информации соответствует количественное значение 100 единиц;
- полезной информации – 60 единиц;
- желательной информации – 30 единиц;
- дополнительной информации– 10 единиц.

Например, в первую очередь АС ППИ запрашивается информация, оцениваемая 100 баллами: по аэродрому вылета это тактико-технические характеристики взлетно-посадочной полосы (ТТХ ВПП), радио-технические средства, METAR, SPESI (метеопрогнозы), карта стандартного вылета по приборам, маршрутная карта, схема выхода из района аэродрома; по аэродрому посадки – ТТХ ВПП, система захода на посадку, навигационная система подхода, TAF (метеопрогноз), карта стандартного прибытия по приборам; по маршруту следования – наличие зон (запретных, опасных, ограничения), РНС по маршруту, фактическая и ожидаемая погода по маршруту,

маршрутная карта; другая важная информация – NOTAM, PIB (извещения для пилотов), коммерческая загрузка, центровка, заправка топливом.

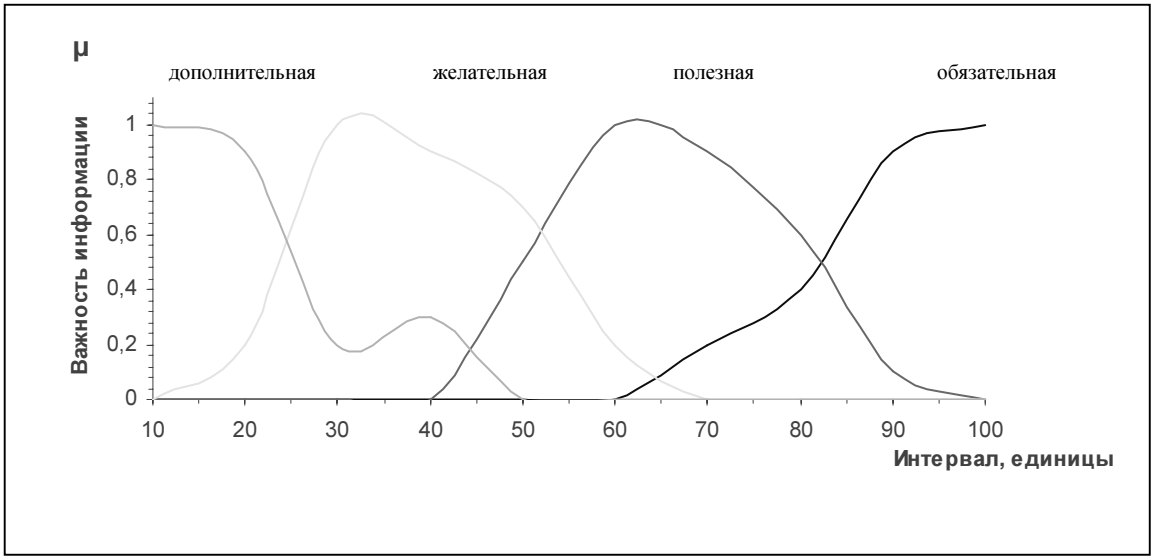


Рисунок 1 - Функции принадлежности терм-множеств «Важность информации»

Таким образом, применение аппарата нечетких множеств позволило преобразовать качественные характеристики востребованности информации в количественные и использовать их в АС ППИ при выборе оптимальной информации в процессе предполетной подготовки ЭВС, что значительно повышает качество предполетной подготовки и сокращает время на ее проведение.

Список литературы

1. Наставление по производству полетов в гражданской авиации СССР (с изменениями и дополнениями). – М.: «Воздушный транспорт», 1985. – 262 с.
2. Наставление по штурманской службе в гражданской авиации СССР. – М.: «Воздушный транспорт», 1986. – 152 с.
3. Унифицированный доступ к службам САИ и МЕТ связанный с предполетным планированием. – Doc. 010. – 1-е изд. Монреаль, Канада, 2000.
4. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990. – 18 с.

УДК 656.7.08.614.8

В.В. Павлова
Державна льотна академія України
Р.В. Жесан, канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Нейросіткова модель прогнозу індивідуальних інформаційних потреб авіадиспетчерів

В статті розглянуто побудову нейросіткової моделі прогнозування інформаційних потреб авіадиспетчерів з метою надання їм інформаційної підтримки та використання результатів прогнозу при формуванні адаптивної інформаційної моделі підтримки в процесі управління повітряним рухом
адаптивна інформаційна модель, нейросіткова модель, управління повітряним рухом, інформаційні потреби, авіадиспетчер, оптимізаційна задача

Вступ

На сьогоднішній день в авіаційних поліергатичних системах гостро постала проблема керування інформаційними потоками, що належать до контуру управління повітряним рухом. Велика кількість типової та нестандартної інформації, яку в кризових ситуаціях оператор автоматизованої системи управління повітряним рухом (АС УПР) повинен сприйняти та обробити в межах жорсткого ліміту часу, входить у протиріччя з фізичними та інтелектуальними можливостями людини-оператора та нерідко призводить до прийняття неефективних та несвоєчасних рішень [1].

Виходом в таких ситуаціях може бути вибіркове представлення інформації на засобах відображення в залежності від індивідуальних особливостей та переваг оператора, реалізуючи методи індивідуального підходу та взаємної адаптації людини і машини [4,5]. Інтелектуальний інтерфейс пропонувалось реалізовувати за допомогою адаптивних інформаційних моделей (АІМ), які повинні взаємно враховувати індивідуальні особливості та потреби авіадиспетчера та параметри АС УПР [8]. Таким чином, виникає задача прогнозу індивідуальних інформаційних потреб авіадиспетчерів, рішенню якої й присвячена дана стаття.

1. Аналіз факторів, що впливають на формування адаптивних інформаційних моделей

АІМ може бути визначена парою:

$$M_{aiм} = \{\Omega_M, \omega_M\}, \quad (1)$$

де Ω_M – структура моделі, ω_M – параметри моделі (переважно ергономічні елементи). Причому структура та параметри моделі змінюються, адаптуючи її безпосередньо до потреб та особливостей конкретного оператора.

Дослідження [5] показали, що найбільш суттєвий вплив на якість інформаційної підтримки оператора в кризових ситуаціях дає саме структура АІМ. Тому необхідно визначити склад, кількість інформаційних об’єктів (ІО) і взаємозв’язки між ними та методи керування ними в АІМ.

У процесі УПР при виникненні кризових ситуацій на ефективність роботи системи «авіадиспетчер-АС УПР» впливає велика кількість факторів, які можна виділити в чотири наступні групи [1,8]:

1. Параметри ситуації, які стосуються льотно-технічних характеристик

© В.В. Павлова, Р.В. Жесан. 2004

повітряного судна, навігаційної обстановки, параметрів польоту і т.ін.

2. Функціональні обов'язки оператора системи, пов’язані з певним диспетчерським пунктом.

3. Поточний стан знань, навичок і вмінь авіадиспетчера, який визначається в процесі первинної підготовки в навчальному закладі та під час стажування в службі руху та зберігається в базі даних „Моделі операторів”.

4. Індивідуальні особливості авіадиспетчера.

Успішність діяльності оператора, швидкість і точність реагування, інформаційні потреби, залежать від його індивідуальних особливостей. Тобто саме вони будуть впливати на модель представлення йому даних у процесі діяльності.

Для оператора АС УПР індивідуальні особливості можуть бути представлені такими аспектами його особистості, як [8]:

- освіта;
- вік і стаж роботи;
- характеристики пам'яті;
- спрямованість інтелекту;
- психічний тип особистості (методика міркувань);
- реакція на стресові ситуації й ін.

Для виявлення залежностей між індивідуальними особливостями авіадиспетчерів та їх інформаційними потребами, а також з метою визначення вагових коефіцієнтів цінності різних інформаційних об’єктів для прийняття рішень в кризових ситуаціях різного типу було проведено експертне опитування методом нестрогого ранжирування [3,7].

Для цього було розроблено анкету, що включає відомості стосовно безпосередньо особистості опитуваного: тип особистості (психологічний тест Айзенків), диспетчерський пункт, стаж роботи диспетчером, клас, рік народження. Анкета пропонує розглянути перелік ситуацій, що могли б реально відбутися під час роботи диспетчера, а також інформацію, що може знадобиться авіадиспетчеру при прийнятті рішення в даних ситуаціях. У процесі анкетування було опитано 30 експертів. Деякі результати експерименту подано у [8].

Було розраховано дисперсію, середньоквадратичне відхилення та коефіцієнт варіації. Для перевірки узгодженості думок по всій сукупності елементів використовувався коефіцієнт конкордації Кендалла для нестрогого ранжирування.

Для перевірки значущості ранжировки було визначено статистичну достовірність коефіцієнта конкордації (для ймовірності похибки $P_{пох} = 1\%$ $\chi^2_{ф} >> \chi^2$).

Коефіцієнти варіації і конкордації показали стійку узгодженість думок експертів.

Щоб визначити вагові коефіцієнти цінності ІО, від рангів R_i до вагових коефіцієнтів ω_i переходимо за допомогою методу ранжировок. Метод заснований на припущенні про лінійну залежність між рангом і відносною цінністю показника ефективності. Ваговий коефіцієнт визначався за формулами:

$$\omega_{\text{I}} = \frac{C_{\text{I}}}{\sum_{\text{I}=1}^{n} C_i}, \qquad (2)$$

де $C_{\text{I}} = 1 - \frac{R_{\text{I}j} - 1}{n}$ – проміжна оцінка;

R_{ij} – ранг i-ого елементу;

n – кількість ІО.

За результатами експерименту створюється матриця $n \times m$:

$$\begin{array}{cccccc} & \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_m \\ A_1 & C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1m} \\ A_2 & C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ A_n & C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nm} \end{array}, \quad (3)$$

де A_i , $i = 1,n$ – інформаційні об'єкти, що увійдуть до складу АІМ;

λ_j , $j = 1, m$ – кризові ситуації, що можуть виникнути при УПР;

C_{ij} – експериментально визначені вагові коефіцієнти цінності i-го об'єкту в j-й ситуації.

За допомогою кореляційно-регресійного аналізу було здійснено спробу визначити ступінь зв'язку між інформаційними потребами й індивідуальними особливостями авіадиспетчерів. Проте отримані результати не дозволили визначити стійкої й чіткої залежності між цими параметрами, отже, вирішення цього питання вимагає пошуку інших важелів керування.

2. Розробка та застосування нейросіткової моделі прогнозу індивідуальних інформаційних потреб авіадиспетчерів

Для прогнозу індивідуальних інформаційних потреб авіадиспетчерів пропонується нейросіткова модель, що повинна визначити, в якій кількості потрібна кожному конкретному авіадиспетчеру нормативно-довідкова, оперативна та прогностична інформація.

Штучні нейронні сітки (ШНС) широко використовуються для пошуку залежностей серед даних та вирішення задач прогнозування. Вони здатні знайти складні скриті залежності серед даних, які не вдається визначити стандартними статистичними методами [2,6].

Доцільність застосування ШНС для розв'язання задач, що слабо формалізуються, в тому числі й задачі визначення залежностей між індивідуальними особливостями та інформаційними потребами авіадиспетчера, обумовлена їх здатністю до навчання на дійсному експериментальному матеріалі [6].

Прогнозування індивідуальних інформаційних потреб авіадиспетчера проводиться на основі двошарової прямонаправленої нейронної сітки (двошарового персептрона) (рис. 1).

Вхідними параметрами моделі є чинники, що характеризують особистість авіадиспетчера. Входи ШНС були обрані наступні:

компонент $\overline{B}$ – психоемоційна характеристика особистості (b_1 – екстраверт; b_2 – інтроверт; b_3 – амбіверт), $\overline{B} = \{b_i\}$, $i = \overline{1,3}$;

компонент $\overline{C}$ – стаж роботи авіадиспетчером (c_1 – від 0 до 3 років; c_2 – від 4 до 10 років; c_3 – від 11 до 20 років; c_4 – від 21 до 30 років (якщо є диспетчери зі стажем роботи більше 30 років, вони відноситимуться до цієї ж категорії))), $\overline{C} = \{c_j\}$, $j = \overline{1,4}$.

компонент $\overline{D}$ – клас авіадиспетчера (d_1 – перший клас; d_2 – другий клас; d_3 – третій клас), $\overline{D} = \{d_k\}$, $k = \overline{1,3}$;

компонент $\overline{E}$ – відношення до управління повітряним рухом (e_1 – безпосереднє УПР; e_2 – обслуговування повітряним рухом;), $\overline{E} = \{e_l\}$, $l = \overline{1,2}$;

У відповідність кожному вхідному параметру ставиться бінарний вектор, який відображає наявність (1) або відсутність (0) певного чинника.

Вихідним параметром моделі є відсоткова доля *Y* оперативної, нормативно-довідкової та прогностичної інформації в загальній кількості ІО, з яких повинна бути сформована АІМ.

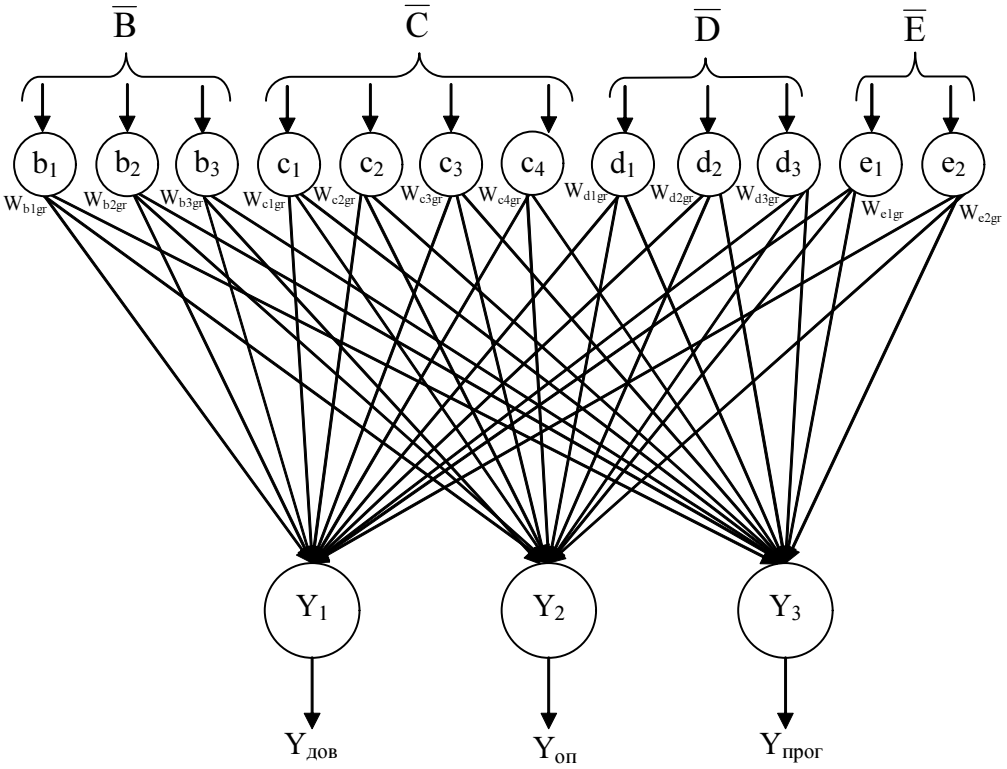


Рисунок 1- Нейросіткова модель прогнозу індивідуальних інформаційних потреб авіадиспетчера

Вхідні компоненти $\overline{B}$, $\overline{C}$, $\overline{D}$, $\overline{E}$ і відповідні їм виходи $Y_{дов}$, $Y_{оп}$, $Y_{прог}$ нейросіткової моделі для тестових прикладів були отримані шляхом експертного опитування досвідчених авіадиспетчерів.

Нейронна сітка реалізована за допомогою нейропакета NeuroPro 0.25.

Навчання ШНС відбувалось шляхом модифікації вагових коефіцієнтів зв'язків між нейронами до моменту, коли помилка досягає мінімального значення й перестає зменшуватись.

Найбільш прийнятним методом навчання ШНС є навчання з вчителем процедурою оберненого поширення помилки [6], суть якого полягає в поширенні помилки від виходів сітки до входів в напрямку, оберненому поширенню сигналів у персептроні.

Для навчання використовувалась нелінійна сигмоїдна функція активації:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-ax}}, \tag{4}$$

де $a > 0$.

Вихідні поля при навчанні сітки оцінювались методом найменших квадратів з люфтом, коли цільовою функцією помилки нейронної сітки, що мінімізується, є величина:

$$\xi = \sum_j P(\frac{Y_j - Y_j'}{\varepsilon}), \tag{5}$$

де $P(\Delta) = \begin{cases} (|\Delta| - 1)^2, & якщо \quad |\Delta| \geq 1, \\ 0, & якщо \quad |\Delta| < 1; \end{cases}$

Y_j та Y_j' – відповідно, вихід згідно з навчальною вибіркою і вихід нейронної сітки;

ε – люфт, який може змінюватись від 0 до границь діапазону змін значень даного поля. Нейропакетом NeuroPro 0.25 люфт автоматично визначається в 10% від діапазону, при цьому сітка навчається передбачати значення даного поля з точністю ±10% від діапазону зміни значень відсоткової кількості ІО, що цілком задовольняє постановці задачі.

Алгоритм навчання розглянутих персептронів був наступний:

1. Проініціювати елементи вагової матриці випадковими числами в інтервалі [0-1].

2. Подати на вхід бінарний вектор вхідних компонентів $\overline{B}$, $\overline{C}$, $\overline{D}$, $\overline{E}$) і вирахувати виходи сітки, що розглядається.

3. Якщо вихід правильний, тобто, ШНС навчилася розрізняти входи, то перейти до п. 5, інакше – обчислити різницю між необхідним і одержаним значенням виходів ξ.

4. Модифікувати ваги у відповідності з формулою:

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \eta\xi x_i, \qquad (6)$$

де t та $(t+1)$ – номера поточної та наступної ітерації;

η – коефіцієнт швидкості навчання, $0<\eta<1$;

x_i – номер i-го входу;

j – номер нейрона у вихідному шарі.

Повторити цикл з п. 2, поки на виході сітки не одержимо $Y_j = Y'_j$ або ξ, що задовольняє постановці задачі.

5. Кінець.

Для навчання ШНС був використаний алгоритм градієнтного спуску зі збуренням, який дозволяє подолати локальні нерівності поверхні помилки і не зупинятися на локальних мінімумах. Метод зворотного поширення з урахуванням збурення реалізує наступне нарощення вагових коефіцієнтів:

$$\delta Wij(t) = \varphi\delta Wij(t - 1) + (1 - \varphi)\eta g(t), \qquad (7)$$

де δ – приріст вектора ваг;

φ – параметр збурення;

η – коефіцієнт швидкості навчання, $0<\eta<1$;

$g(t)$ – вектор градієнта функціонала помилки на t-й ітерації.

Тестування сіток на прикладах, які не входили до навчальної вибірки, показало високу точність визначення відсоткової кількості ІО певного типу (помилка Δ між дійсною та отриманою за допомогою ШНС величиною складає до 10% від діапазону зміни його значень), що підтверджує достовірність запропонованої моделі.

Зручність використання обраного нейропакету також доводить отримання вербального опису нейронної сітки, який відтворює набір правил, що використовуються ШНС для вірного розв'язання задачі.

3. Формування АІМ на основі модифікованої оптимізаційної задачі про завантаження рюкзака

Отримані прогнозні дані щодо індивідуальних потреб авіадиспетчера з кількості нормативно-довідкової, оперативної та прогностичної інформації введемо в якості обмежень до оптимізаційної задачі формування АІМ. За основу була взята відома задача цілочисельного програмування „про завантаження рюкзака" [5,11].

Таким чином виникає задача визначення максимального набору найбільш цінних інформаційних об'єктів, що за час $t_{\text{рсп}}$ можна сформувати і вивести в j-й ситуації на всі засоби відображення інформації авіадиспетчеру за умови, що вони будуть сприйняті ним цілком.

Позначимо $C_1, C_2, ..., C_n$ показники цінності інформаційних об'єктів $A_1, A_2, ..., A_n$, що повинні бути включені до складу АІМ для кризової ситуації, а час їхнього сприйняття – $t_1, t_2, ..., t_n$. Потрібно з усього набору ІО вибрати найбільш цінний набір (з максимальною сумарною цінністю інформаційних об'єктів), сумарний час сприйняття якого укладається в $t_{рсп}$. Таким чином, отримуємо оптимізаційну задачу.

Уведемо змінні $x_1, x_2, ..., x_n$, обумовлені умовою:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \textit{якщо інформаційний об'єкт входить до складу АІМ} \\ 0, & \textit{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Параметр t_i з погляду сприйняття інформаційної моделі можна прийняти як адитивний і при заданих значеннях $x_1, x_2, ..., x_n$ сумарний час сприйняття такого набору інформаційних об'єктів дорівнює $t_1x_1 + t_2x_2 + ... + t_nx_n$. Тоді умова обмеження часу на сприйняття рішення записується у вигляді нерівності

$$t_1x_1 + t_2x_2 + \ldots + t_nx_n \le t_{рсп}, \tag{8}$$

а загальна цінність набору інформаційних об'єктів, що повинна бути максимізована, дорівнює

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i x_i \Rightarrow \max \tag{9}$$

Загальна кількість нормативно-довідкової інформації повинна бути не нижчою за прогнозну кількість $Y_{дов}$, загальна кількість оперативної – не менше за $Y_{опер}$, і прогностичної відповідно – за $Y_{прог}$.

Поєднуючи все вищезгадане (8) та (9), запишемо повний вид оптимізаційної задачі формування АІМ:

$$\begin{gathered} \sum_{i=1}^{n} C_i x_i \Rightarrow \max \\ x_{1\,дов} + x_{2\,дов} + \cdots + x_{j\,дов} \ge Y_{дов} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \\ x_{1\,оп} + x_{2\,оп} + \cdots x_{k\,оп} \ge Y_{оп} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \\ x_{1\,прог} + x_{2\,прог} + \cdots x_{l\,прог} \ge Y_{прог} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} t_i x_i \le t_{рсп}, \quad x_i \in \{0,1\}, \quad i = 1,\ldots n \end{gathered} \tag{10}$$

Поставлена задача є задачею лінійного цілочисельного програмування і може бути вирішена шляхом покрокової оптимізації за допомогою методу динамічного програмування [11]. Дуже зручним є автоматизоване вирішення цієї задачі за допомогою надбудови табличного процесору Microsoft Excel „Пошук рішення", в якому реалізовано рішення оптимізаційних задач методом сполучених градієнтів.

В процесі УПР відбувається ідентифікація кризової ситуації та віднесення її до одного з λ_j класу. Тоді на основі вагових коефіцієнтів цінності C_{ij}, що відносяться до цього класу ситуації, та індивідуальних переваг щодо типів інформації й часу сприйняття об'єктів A_i [10] вирішується вищезгадана оптимізаційна задача (10). Результатом є пошарове формування АІМ та її реалізація за допомогою засобів геоінформаційних технологій. При цьому виникає питання щодо категоричності видачі

інформаційної підказки системою оператору. Керувати категоричністю пропонувалось на основі коефіцієнтів складності ситуації, а також індивідуальних когнітивних моделей спеціаліста з УПР [9].

Висновки

Отримана нейросіткова модель дозволить індивідуалізувати процес надання інформаційної підтримки, адаптуючи інформаційну модель до різних компонент особистості авіадиспетчера. Врахування при формуванні адаптивної інформаційної моделі прогнозних потреб авіадиспетчера в нормативно-довідковій, оперативній та прогностичній інформації зробить процес прийняття рішень в кризових ситуаціях більш ефективним та зручним.

Подальша робота в цьому напрямку бачиться в розробці критеріїв класифікації типів кризових ситуацій, трансформації прийнятих в авіації якісних характеристик кризових ситуацій в кількісні за допомогою методів теорії нечітких множин.

Список літератури

1. Doc. 9758-AN/966. Основные принципы учета человеческого фактора в системах организации воздушного движения (АТМ). – Монреаль, Канада, 2000.
2. Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А. Нейронные сети в системах автоматизации. – К.: ”Техника”, 1999. – 364 с.
3. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
4. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: эволюция, психология, информатика. М: «Машиностроение», 1990. – 446 с.
5. Герасимов Б.Н., Тарасов В.А., Токарев И.В. Человеко-машинные системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта. К.: «Наукова думка», 1993 г. – 184 с.
6. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – 2-е изд., стереотип. – М.: Горячая линия–Телеком, 2002. – 382 с.
7. Макаров И.М., Виноградская Т.М. и др. Теория выбора и принятия решений: Учебное пособие. – М. Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 328 с.
8. Неделько В.Н., Павлова В.В. Адаптация информационного взаимодействия в автоматизированных системах обслуживания воздушного движения // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „АВІА 2002”, Том II. – К.: НАУ, 2002. – С. 21.5-21.8.
9. Павлова В.В. Методи формування вихідної когнітивної моделі спеціаліста з управління повітряним рухом // Аерокосмічні системи моніторингу та керування: Матеріали VI міжнар. наук.-техн. конф. “АВІА–2004”. – К.: НАУ, 2004. – Т.2. – С. 21.95–21.98.
10. Павлова В.В., Ізвалов О.В. Використання експериментальної оцінки часу сприйняття інформації для оптимізації інтелектуального інтерфейсу в автоматизованих системах управління повітряним рухом // „Искусственный интеллект”, 2004 г. (в печати).
11. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1986. – 328 с.

УДК 519.7

Я.В. Смітюх, асп., В.Д. Кишенько, доц., канд. техн. наук.
Національний університет харчових технологій

Модель брагоректифікаційної установки як об'єкта керування

Наведена ієрархічна математична модель процесів брагоректифікації, яка побудована з використанням системного підходу та принципів самоорганізації.
математичне моделювання, брагоректифікація, тепло-масообмін

Процес брагоректифікації – є складною фізико – хімічною системою, суттєвою особливістю якого є те, що сукупність складових його явищ носить детерміновано-стохастичну природу, яка полягає в накладенні стохастичних особливостей гідродинамічної обстановки в апараті на процеси масо-теплообміну та хімічних перетворень. Це пояснюється випадковими взаємодіями складових компонентів фаз, або випадковим характером геометрії граничних умов в апараті[1].

Подібного роду система характеризуються надзвичайно складною взаємодією фаз та компонентів, внаслідок чого вивчення їх з позицій класичних детермінованих законів переносу та збереження є неможливим.

Ключ до вирішення цієї проблеми дає метод математичного моделювання, що базується на стратегії системного аналізу[4], та теорії самоорганізації[3], що досліджує процеси утворення складних структур в процесі міжфазного переносу та нерівноважних фазових переходів. Такий підхід дає ключ до вирішення проблем з підвищенням якості та ефективності керування брагоректифікаційною установкою. На даний час ця проблема є актуальною і потребує подальших досліджень.

На початковому етапі розробки автоматизованої системи керування необхідним є розгляд комплексу математичних моделей, які відображають статику та динаміку процесів брагоректифікації. Такий підхід дозволить здійснити дослідження процесів брагоректифікації шляхом комп'ютерного експерименту для виявлення параметрів порядку(основних керуючих змінних [3]). Матеріал даної статті висвітлює ієрархію моделей процесу брагоректифікації з точки зору системного аналізу[4].

Виділено п'ять рівнів ієрархії фізико-хімічної системи брагоректифікації:

1) сукупність явищ на молекулярному рівні;
2) ефекти в масштабі надмолекулярних або глобулярних структур(компонентів);
3) опис гідравлічних явищ на рівні тарілки колони;
4) тепло-масообмінних процесів брагоректифікації, фізико-хімічних явищ в ансамблі включень різних компонентів бражки;
5) техніко-економічний рівень.

Першим рівнем ієрархії є фізична кінетика процесів на молекулярному рівні[2]. Основа опису складається:

- з рівнянь, які описують фізико-хімічну кінетику хімічної термодинаміки парової та рідкої фази в брагоректифікаційній установці;
- рівнянь розрахунку кінетичної швидкості молекул;
- складання рівнянь швидкостей реакцій та розрахунок кінетичних констант з врахуванням розподілу Максвела;
- стехіометричного аналізу та складання відповідних рівнянь.

© Я.В. Смітюх, В.Д. Кишенько. 2004

Другий рівень ієрархії процесу брагоректифікації описує основні залежності для ефектів в масштабі надмолекулярних або глобулярних структури(одного компоненту бражки)[1,2].

Аналітичний опис другого рівня включає:

- рівняння, які враховують ступінь сегрегації системи;
- опису структур надмолекулярних утворень;
- гетерофазних хімічних процесів .

Важливими з точки зору задач синтезу систем керування технологічними процесами є розгляд моделей вищих рівнів, оскільки такі моделі відображають основні закономірності поведінки як окремої секції, так і всієї брагоректифікаційної установки .

Третім рівнем ієрархії є опис:

- механіки гідравлічних явищ контактного пристрою виходячи з конструктивних особливостей тарілки;
- термодинаміки поверхових явищ;
- рівняння опису фазової рівноваги.

Розглянемо одномірну модель тарілки при наступних припущеннях:

вплив в'язкості не враховується; рух вздовж тарілки є нестаціонарним; нормальна компонента швидкості та тиск лінійно змінюються з глибиною.

При розрахунку динаміки тарілки з переливними пристроями, використовується залежність витрати рідини на тарілку F_t від рівня рідини в переливному патрубку h_p.

Формула для визначення витрати рідини $F_t(h_p)$:

$$F_t(h_p) = h\rho^2 g(h_p - h)s \tag{1}$$

де h_p - рівень рідини в переливному патрубку, м;

s -зазор, м;

h - рівень рідини на тарілці, м;

ρ - густина рідини кг/м^3;

g - прискорення вільного падіння, м/с^2.

Для моделювання фазової рівноваги процесів брагоректифікації, застосовуємо наступне рівняння:

$$y = \frac{1}{a + bx^{1,5} + c/x} \tag{2}$$

де a = 0,015130852;

b = -0,00000159907;

c = 0,076465132

та

$$y = a + bx + cx^{1,5} + dx^{0,5} + e/x \tag{3}$$

де a = -56,344742;

b = -5,8091226;

c = 0,3140708;

d = 42,025344;

e = 191,37717;

x - концентрація етанолу у рідині;

y - концентрація етанолу у парі.

Перше рівняння описує криву фазової рівноваги в діапазоні молярних часток 0,004 ... 31,47 % , друге - від 16,77 до 89,41 % . Такий підхід пояснюємо тим, що в зоні тарілки живлення можуть відбуватися деякі зміни, що мають вплив на стабільність роботи колони, що є важливою особливістю при синтезі системи автоматизованого керування. Наприклад, концентрація і температура епюрату можуть змінюватися, тому ми уточнюємо розрахунок в зоні тарілки живлення (діапазон 16,77 ... 31,47 % мол).

Одним із важливих напрямів використання кривої фазової рівноваги є розрахунок кількості контактних пристроїв та розрахунок динаміки зміни концентрації на рівні тарілки, а також по всій довжині кожної з колон при моделюванні динаміки процесів брагоректифікації на вищих рівнях ієрархії математичної моделі.

Четвертий рівень ієрархії складається з опису процесів масообміну та теплообміну на контактному пристрої (тарілці) однієї з колон [1].

В цілому підхід до побудови математичної моделі масообміну слід розпочати з опису явищ масо-теплообміну на рівні тарілки, тобто представити модель за допомогою рівнянь переносу тепла та маси, при цьому слід врахувати конструктивні параметри тарілки.

Моделювання процесу брагоректифікації диференційними рівняннями в частинних похідних корисний через те, що для цих систем є достатньо повна теорія, яка дозволяє передбачити деякі властивості вирішення ще до числових результатів. Для більшості промислових умов брагоректифікації перехід до систем рівнянь в частинних похідних зробити можливо. В точках вводу сировини в колони, де потоки та концентрації змінюються стрибкоподібно, необхідно записати рівняння матеріального балансу і користуватися ними як граничними умовами. Але з фізичної точки зору раціональніше записати різницеві рівняння зразу для звичайних диференційних рівнянь. В такому випадку ми не зв'язані потребою плавності функції, яке в деяких випадках може бути дуже жорстким[2].

Для рівнянь цього рівня слід записати рівняння:

Утримуючої здатності тарілки k_1 в рідкій фазі:

$$k_1 = (h_p s_1 + s_2 h(h_p))c_1 \tag{4}$$

Утримуючої здатності тарілки в паровій фазі:

$$k_2 = s_2(\Delta l - h(h_p))c_2 \tag{5}$$

Витрати рідини на тарілку, моль/год:

$$L = \Delta l F_t c_1 \tag{6}$$

Витрати пари через тарілку, моль/год:

$$V = \frac{\pi n d^3 c_2}{6\tau}. \tag{7}$$

де s_1 – площа перерізу патрубка, м^2;

s_2 - активна площа тарілки, м^2;

n – число отворів в тарілці;

d – діаметр одного отвору, м;

c_1 - молекулярний кількісний вміст окремого компоненту в одиниці об'єму флегми, моль;

c_2 - молекулярний кількісний вміст окремого компоненту в одиниці об'єму пари, моль;

τ - час утворення однієї бульбашки пари, с;

Δl - окрема ділянка колони, м.

Враховуючи формули (4)-(7) запишемо систему рівнянь масообміну на i-тій тарілці

$$\begin{cases} \dfrac{\partial k_1 x_i^k}{\partial t} - \dfrac{\partial L x_i^k}{\partial l} = k_m (y_i^k - y_i^*) + \delta_x^k; \\ \dfrac{\partial k_2 y_i^k}{\partial t} + \dfrac{\partial V y_i^k}{\partial l} = k_m (y_i^* - y_i^k) + \delta_y^k; \end{cases} \quad (8)$$

де x_i^k, y_i^k – концентрації компоненту відповідно в рідині та в парі, моль;

L, V – потоки рідини та пару, кмоль/год;

k_1, k_2 - утримуюча здатність тарілки відповідно в рідинній, та паровій фазі коефіцієнти які визначаються на основі конструктивних особливостей тарілки(відповідно для рідини та пари, кмоль/м;

y_i^*, x_i^* - рівноважна концентрація (визначається за допомогою формул попереднього рівня), моль;

δ_x^k, δ_y^k - функції, що визначають значення густини потоку k - того компоненту по довжині колони та стохастичний характер зміни якісних показників сировини відповідно в рідині та парі., кмоль/(год*м);

залежність $k(y_i - y_i^*)$ визначає неперервний по всій довжині колони фазовий перехід i - того компоненту;

k_m - коефіцієнт масопередачі.

При дослідженні колон брагоректифікаційної установки необхідно врахувати в загальному записі системи рівнянь – рівняння що описують теплообмін, а саме рівняння нестаціонарної теплопередачі на тарілках колони.

$$\begin{cases} \dfrac{\partial k_1 h}{\partial t} - \dfrac{\partial (Lh)}{\partial l} = k_T (t_П - t_Ж) + \delta_x^k; \\ \dfrac{\partial k_2 h}{\partial t} - \dfrac{\partial (VH)}{\partial l} = k_T (t_ж - t_п) + \delta_y^k; \end{cases} \quad (9)$$

де h, H – ентальпії, Дж/кг;

k_T – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м^2*К);

$t_П$, $t_Ж$ - температура пари та рідини, С^0;

δ_x^k, δ_y^k - функції, що визначають значення густини потоку k - того компоненту по довжині колони та стохастичний характер зміни якісних показників сировини відповідно в рідині та парі., кмоль/(год*м).

В результаті моделювання процесів брагоректифікації в середовищі Matlab на основі рівнянь четвертого рівня аналітичного опису отримані результати (з врахуванням зосередженості параметрів рівняння) на прикладі ректифікаційної колони брагоректифіакційної установки при таких вихідних даних: кількість тарілок колони 67, початкова концентрація спирту в живленні ректифікаційної колони (початкове значення концентрації рідини на тарілці живлення), x_0 = 0.70 моль, початкові значення концентрації спирту в рідині x_0=0.001 моль, та парі y_0=0.001 моль, витрата пари V=300 кмоль/год. Отримані характеристики наведені на рис.1 та рис. 2 (залежності взяті відносно просторової кординати – довжини колони).

П’ятий рівень ієрархії являє модель техніко-економічного рівня:

Кількість продуктів розділення після кожної колони(розглядається три колони (i-1, 2, 3) бражна, епюраційна та ректифікаційна) визначається таким співвідношенням.

$$D = \frac{F_i^* x_{Fi}}{x_{D_i}^*} \tag{10}$$

де F_i^* - витрати живлення на i - ту колону;

x_{Fi} - концентрація спирту в живленні i-тої колони;

x_{D_i} - концентрація спирту в продукті розділення після i - тої колони.

Оцінюючи статичні та динамічні режими роботи брагоректифікаційної установки в цілому, а також кожної колони в окремому випадку можна записати модель:

$$Z_i = aV_i + bW_i x_{0i} \tag{11}$$

$$E = cD - \sum_i Z_i \tag{12}$$

де Z_i - виробничі витрати на процес в i - тій колоні;

V_i - витрати пари на i-ту колону (i=1, 2, 3);

$W_i x_{0i}$ - втрати цільового продукту розділення з кубовою рідиною(i=1, 3);

E – прибуток від функціонування брагоректифіакційної установки;

D - витрати(відбір) спирту ректифікату;

a, b, c - відповідні вартості.

Наведена ієрархічна модель процесів брагоректифікації побудована на принципах системного підходу та самоорганізації з врахуванням розподіленості та зосередженості параметрів відображає цільову поведінку основних змінних стану.

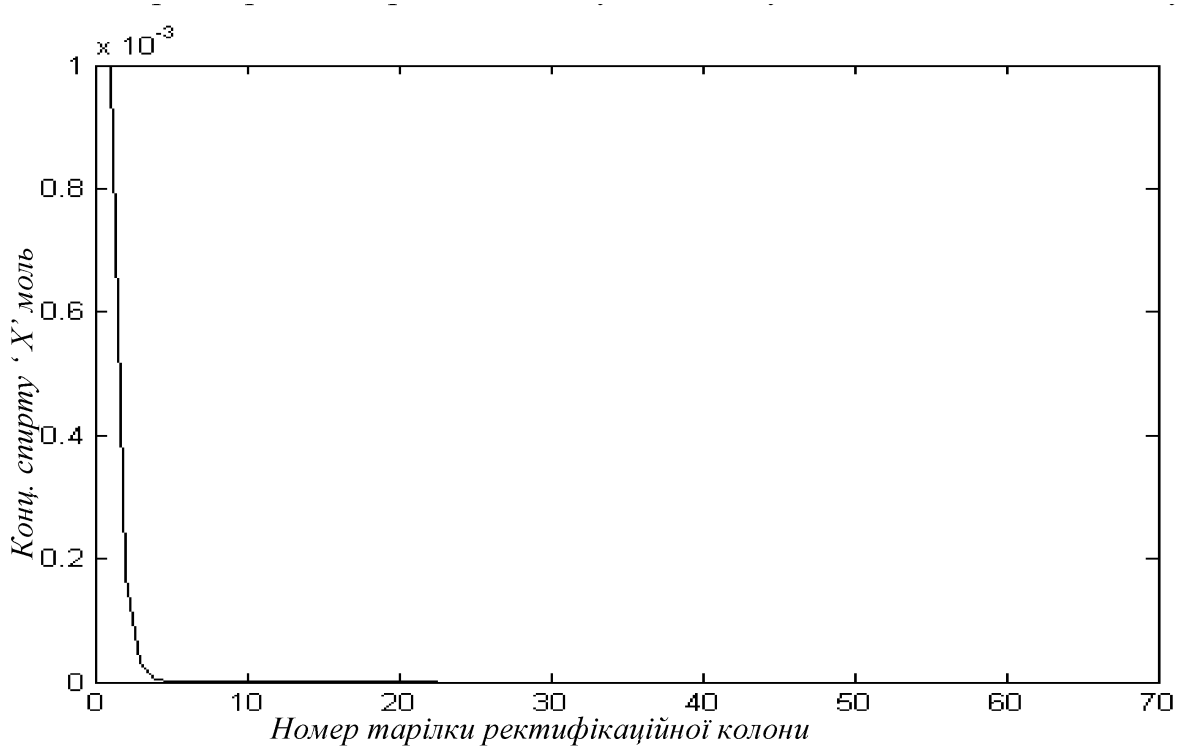


Рисунок 1 - Зміна концентрації спирту в рідині

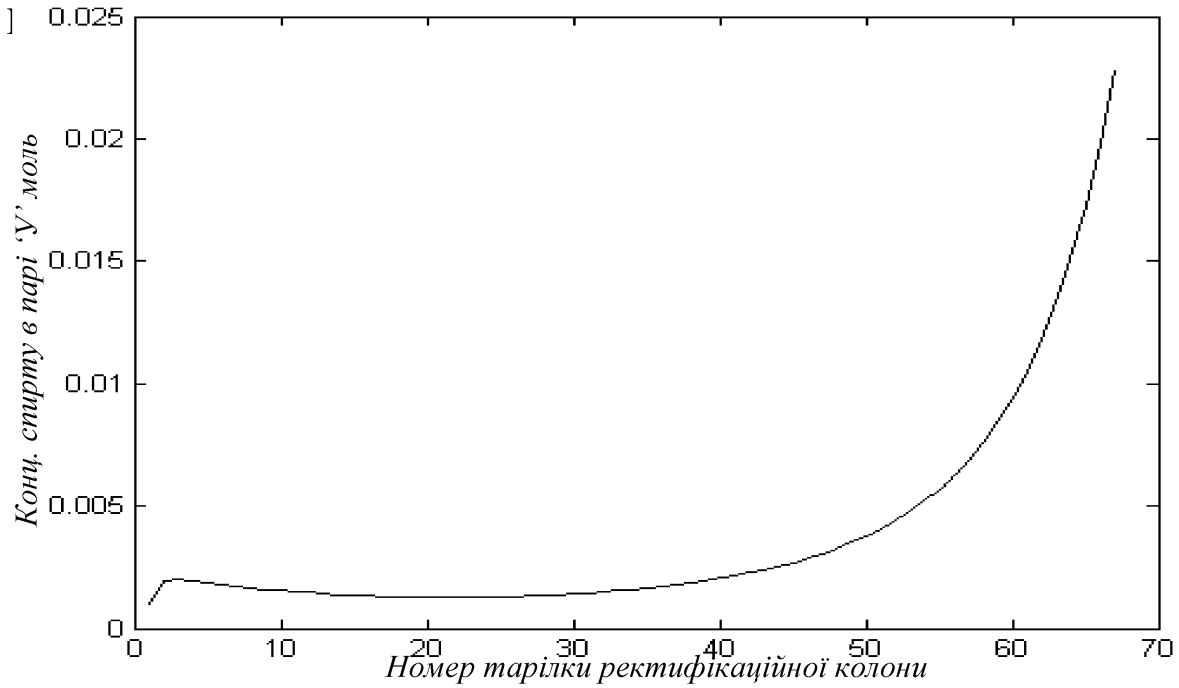


Рисунок 2 - Зміна концентрації спирту в парі

З аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що дослідження моделі з зосередженими параметрами дозволить здійснити аналіз процесу брагоректифікації з точки зору теорії самоорганізації.

Список літератури

1. Мандельштейн М. Л. Автоматические системы управления технологическим процессом брагоректификации. - М.: Пищевая промышленность 1975. - 240 с.
2. Анисимов И.В. Бодров В.И и др. Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок. - М.Химия, 1975. - 216 с
3. Колесников А.А. Синергетическая теория управления . - М .: Энергоатомиздат., 1994. - 344 с.
4. Кафаров В.В.,Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. - М.,Наука, 1976. - 500 с.

УДК 636.082

В.В. Войтюк, асистент, В.О.Версаль, І.І.Єніна, доценти, канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

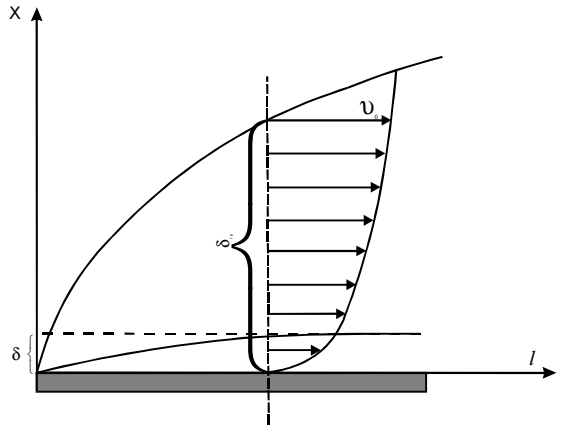
Компенсація впливу зміни електропровідності рідини на перетворювач швидкості в датчику витрат молока

Стаття присвячена вирішенню задачі компенсації впливу зміни електропровідності на перетворювач швидкості датчика витрат молока з метою зменшення його похибки вимірювання.
перетворювач швидкості, датчик витрат молока, **дифузійний шар, електропровідність**

Перетворювач швидкості (ПШ) є однією із складових частин датчика витрат молока [1]. В основу роботи перетворювача швидкості покладена залежність дифузійної складової струму електрохімічної комірки від швидкості рідини біля електроду внаслідок руйнування дифузійного шару. Електропровідність молока може змінюватись в широких межах, що спричиняє велику похибку вихідних даних перетворювача швидкості і в результаті датчика витрат молока в цілому.

Для побудови датчика витрат молока, який би відповідав вимогам точності, необхідно компенсувати вплив зміни електропровідності молока на вихідну величину перетворювача швидкості.

Згідно теорії Нернста [2], концентрація дифундуючої речовини змінюється лінійно всередині повністю нерухомого дифузійного шару. Однак теоретично не існує чіткої межі між нерухомим дифузійним шаром і рухомим розчином електроліту. Поява градієнту в'язкості завжди викликає появу градієнта швидкості руху рідини. У зовнішній частині дифузійного шару конвекція речовини, як правило, співпадає з його дифузією. Зміна концентрації в залежності від відстані від поверхні електрода X схематично зображена на рис. 1.



l – відстань від краю електрода:
$\delta_{гр}$ – товщина гідродинамічного шару;
δ – товщина дифузійного шару.

Рисунок 1 – Зміна швидкості руху електроліту в залежності від відстані від поверхні електрода

© В.В. Войтюк, В.О.Версаль, І.І.Єніна. 2004

Згідно гідродинамічної теорії товщина граничного шару залежить від швидкості руху потоку відносно твердого тіла v_0, кінематичної в'язкості ν, а також від положення вибраної точки відносно точки набігання потоку

$$\delta_{гр} \approx \nu^{0.5} \cdot v_0^{-0.5} \cdot l^{0.5}. \quad (1)$$

В відповідності з розвинутою Левичем [3] теорією, між товщиною дифузійного шару δ і граничним шаром рідини $\delta_{гр}$ існує визначене співвідношення:

$$\delta \approx (\frac{D}{\nu})^{1/3} \cdot \delta_{гр}. \quad (2)$$

Для водних розчинів D і ν мають значення порядку 10^{-5} та 10^{-2} $см^2 \cdot сек^{-1}$ відповідно.

$$\delta \approx D^{1/3} \cdot \nu^{1/6} \cdot l^{1/2} \cdot \upsilon^{-1/2}, \quad (3)$$

де D – коефіцієнт дифузії.

Залежність товщини дифузійного шару в молоці від відстані до точки набігання потоку при різній швидкості рідини приведена на рис. 2 .

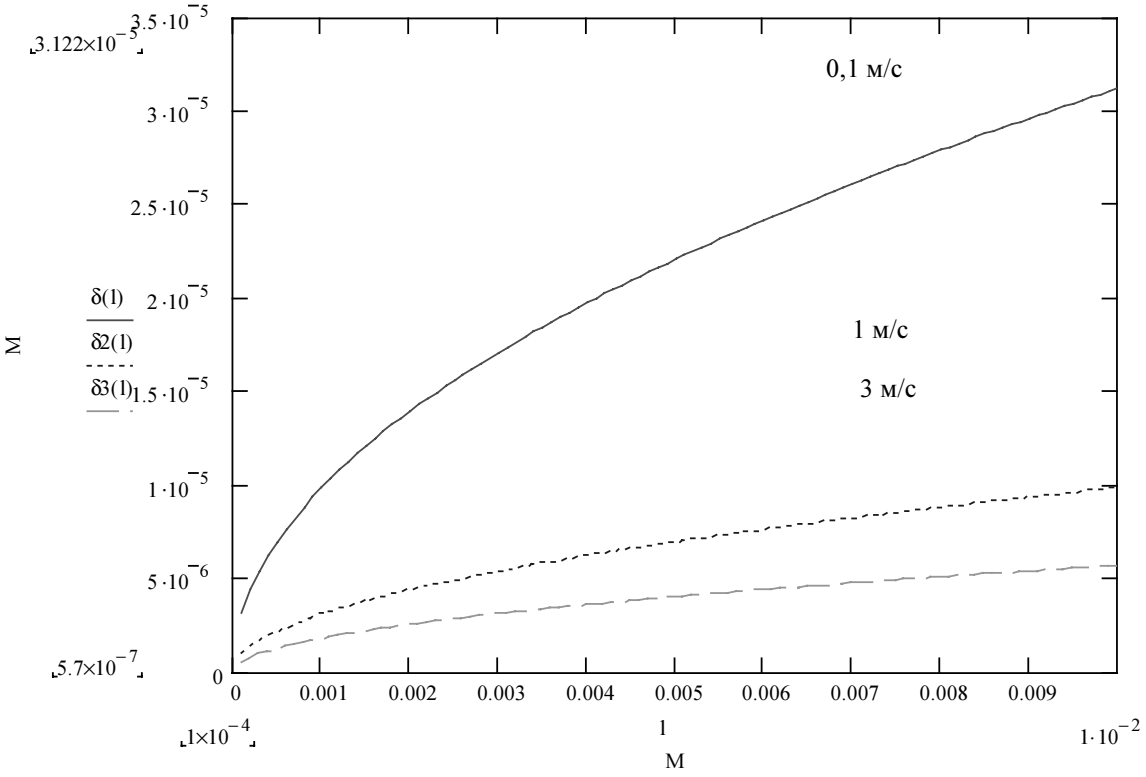


Рисунок 2 – Залежність товщини дифузійного шару в молоці від відстані до точки набігання потоку при різній швидкості рідини

З рис.2 видно, що найбільша залежність товщини дифузійного шару від швидкості лежить на початковій ділянці електроду, з чого можна зробити наступний висновок: чим менша довжина електроду в напрямку руху рідини, тим вища залежність середньої товщини дифузійного шару від швидкості рідини. Таким чином два електроди різної довжини будуть мати різну чутливість до зміни швидкості.

Вихідним параметром перетворювача швидкості є напруга U, яка залежить від величини швидкості молока в молокопроводі, електричного струму комірки, температури та електропровідності молока. [4]

$$U = IR_{ел} + (n_1 \cdot R \cdot T / n \cdot F) \cdot \ln \frac{1 - I / I_{г.д.к.}}{1 - I / I_{г.д.а.}}, \quad (4)$$

де F = 96500 Кл/г·екв – число Фарадея;

$R_{ел}$ – опір маси електроліту;

$I_{г.д.к.}, I_{г.д.а.}$ – граничні струми дифузії відповідно на катоді і аноді.

R – газова постійна;

T – абсолютна температура;

$n \cdot F / n_1$ – електричний заряд кожного іона що, бере участь в процесі переносу.

$$I_{г.д.} \approx \frac{n}{n_1} \cdot F \cdot D \cdot S \cdot \frac{C_0}{\delta}, \quad (5)$$

де S – площа поверхні електроду;

C_0 – концентрація реагенту в масі електроліту поза межами дифузійного шару;

δ – товщина дифузійного шару.

За приведеними формулами можна розрахувати залежність вихідної напруги від швидкості рідини.

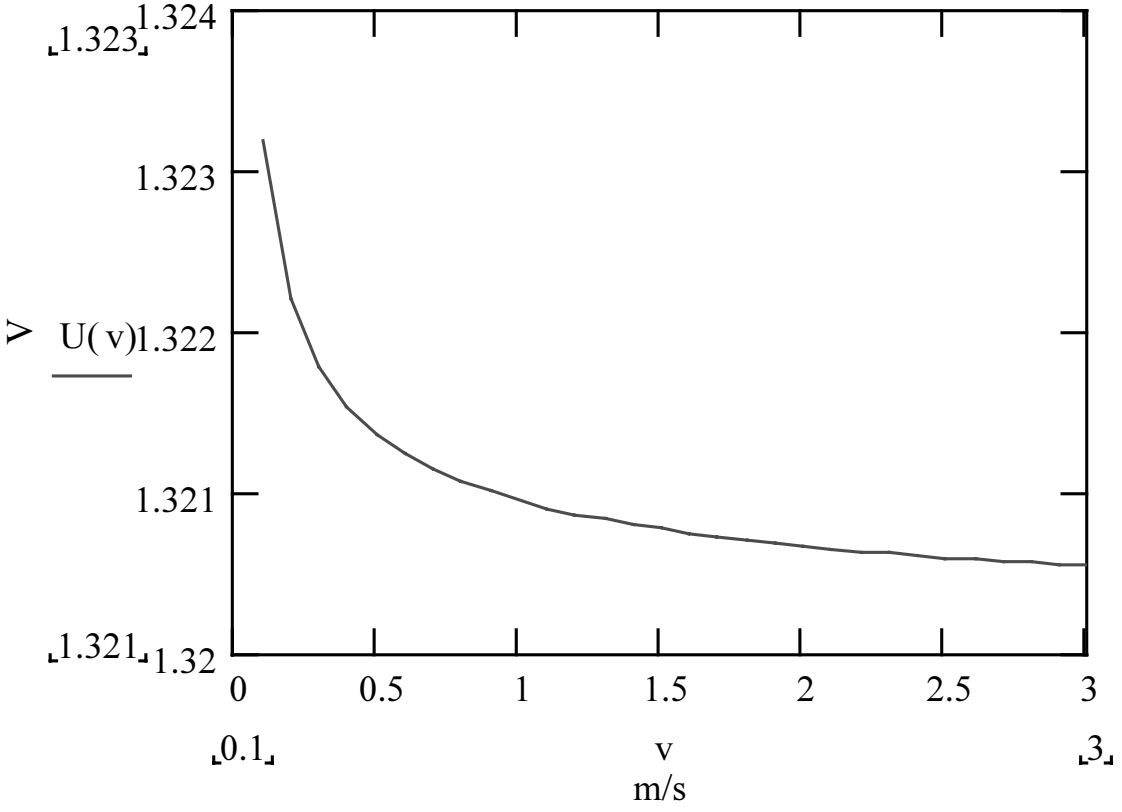


Рисунок 3 – Залежність вихідної напруги ПШ від швидкості

Залежність вихідної напруги ПШ при різній електропровідності рідини представлено на рис. 4 .

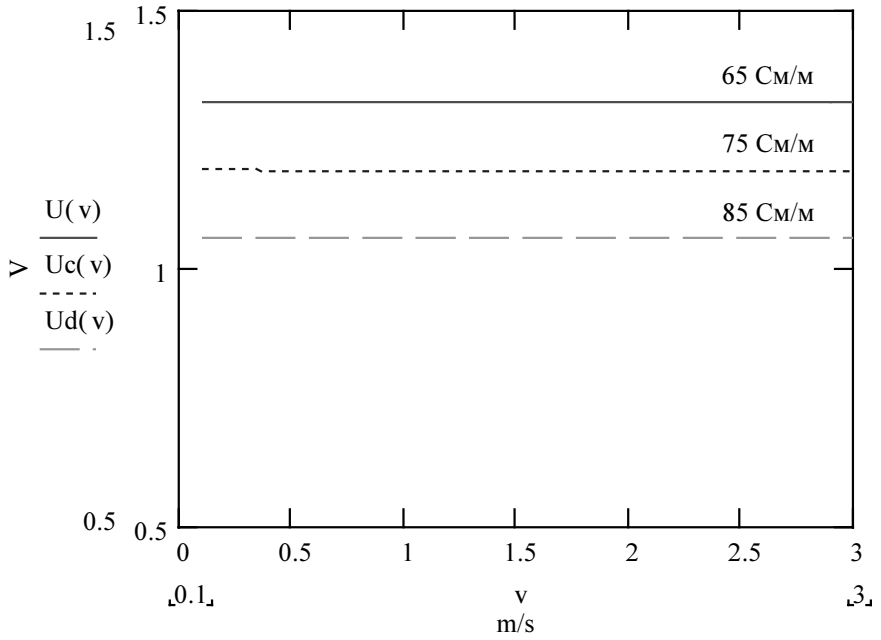


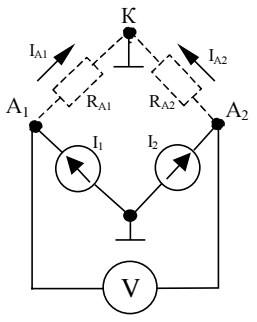
Рисунок. 4 – Залежність вихідної напруги ПШ при різних значеннях електропровідності молока

Як видно з рис. 4 вплив зміни електропровідності на вихідну напругу ПШ набагато більший ніж вплив зміни швидкості, що робить неможливим використання такого перетворювача без компенсації при побудові датчика витрат молока.

Існують способи компенсації за допомогою використання додаткового компенсаційного електрода, який розташований в вимірюваному середовищі [4,5].

Виходячи з умови, що залежність середньої товщини дифузійного шару на електродах з різною довжиною в напрямку руху потоку від швидкості різна. Залежність падіння напруги на таких електродах від зміни швидкості також різна, а залежність падіння напруги в електроліті пропорційна розмірам електродів. При умові протікання через комірки з такими електродами, струму пропорційного розмірам електродів, падіння напруги на комірках буде однаково змінюватись зі зміною електропровідності електроліту і неоднаково змінюватись при зміні швидкості електроліту. Використовуючи таку властивість комірок можна побудувати перетворювач швидкості, вплив зміни електропровідності електроліту на який буде скомпенсовано.

Схема заміщення перетворювача швидкості з використанням компенсаційного електроду представлена на рис. 5.



A_1 – контрольний електрод; A_2 – компенсаційний електрод;
K – катод; I_1, I_2 – джерела струму.

Рисунок 5 – Схема заміщення скомпенсованого ПШ

При використанні такої схеми вихідна напруга ПШ буде описуватись виразом:

$$U_p = U_{A1} - U_{A2}. \quad (5)$$

Залежність вихідної напруги ПШ з використанням компенсаційного електрода від швидкості молока при різних значеннях електропровідності приведена на рис. 6 .

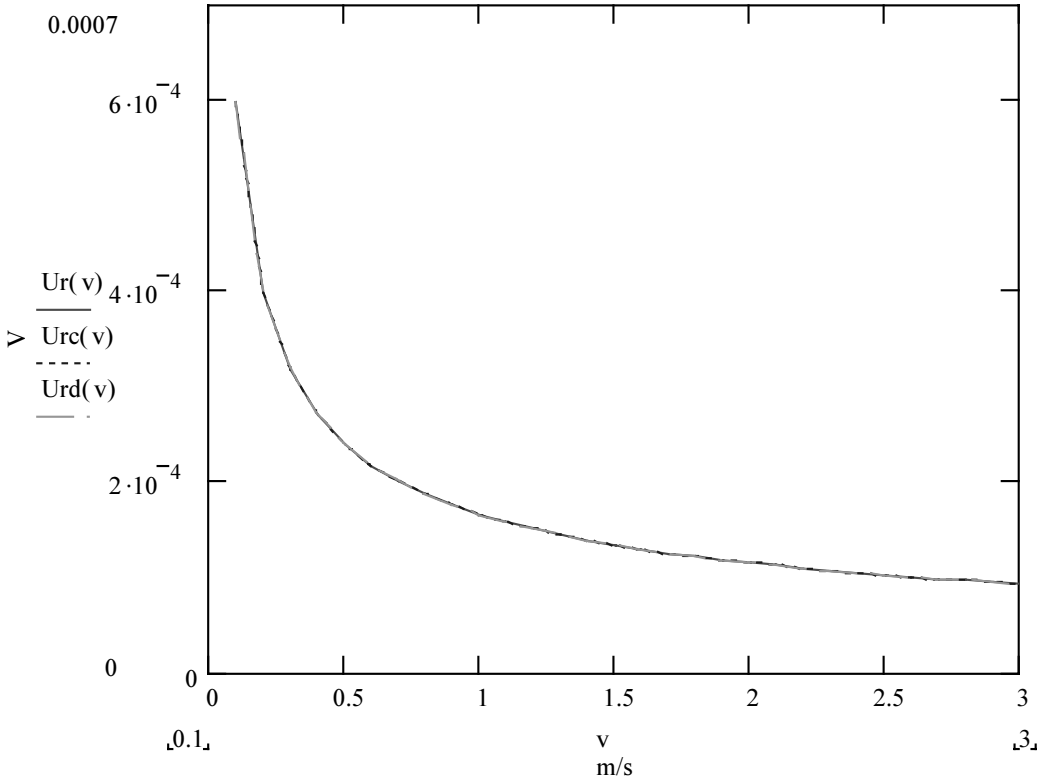


Рисунок 6 – Залежність вихідної напруги ПШ з використанням компенсаційного електрода від швидкості молока при різних значеннях електропровідності

Використання запропонованої схеми з компенсаційним електродом дозволяє зменшити вплив електропровідності на результуючу величину вихідного сигналу ПШ.

Список літератури

1. Версаль В.А. Войтюк В.В. Обґрунтування способу вимірювання витрат молока //Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету „Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація". 2000. вип. №6.– С.123-125.
2. Левин А.И. Теоретические основы электрохимии – М.: Металлургия, 1972. – 253 с.
3. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.
4. Фиш М.Л., Лаптев Ю.В. Диффузионные преобразователи неэлектрических величин – К.: Техніка, 1979 – 120 с.
5. Фомин И.К. Хемотронный измеритель скорости потоков электропроводящих жидкостей с компенсацией помех //Измерительная техника. 1976. №1.–С. 57-59.

УДК 621.391.83

В.В. Смирнов, канд. техн. наук, Н.В. Смирнова, студ.
Кировоградский государственный технический университет

Применение механизма прерываний микроконтроллеров для реализации однопроводного асинхронного интерфейса передачи данных

В статье изложен принцип построения однопроводного асинхронного интерфейса передачи данных между микроконтроллерами в многопроцессорной системе.
микропроцессорная техника, связь, системы управления

Современные микропроцессорные системы управления имеют сложную структуру, обусловленную сферой применения и часто имеют в своем составе несколько микроконтроллеров, выполняющих различные специфические задачи. Возникает необходимость в синхронной работе всех компонентов системы и принятии решений в соответствии с заданным алгоритмом.

Важнейшим фактором является достоверность передаваемой информации, которая в значительной мере зависит от интерфейса передачи данных, используемого протокола и физических характеристик среды передачи данных. Для обмена информацией между микроконтроллерами традиционно используются интерфейсы RS-232 - RS-485, I^2C, SMBus и другие.

Проблема заключается в том, многие микроконтроллеры не имеют в своем составе средств для реализации функций связи по последовательному интерфейсу. Кроме того, интерфейсы RS-232 - RS-485 требуют фиксированной частоты синхронизации модулей приема-передачи данных. Интерфейсы I^2C, SMBus имеют отдельные проводники для данных и стробирующих сигналов, поэтому являются более гибкими (рисунок 1).

Тем не менее, использование двух выводов микроконтроллера для решения задачи обмена данными является не всегда рациональным, особенно в случаях применения микроконтроллеров с 8 выводами.

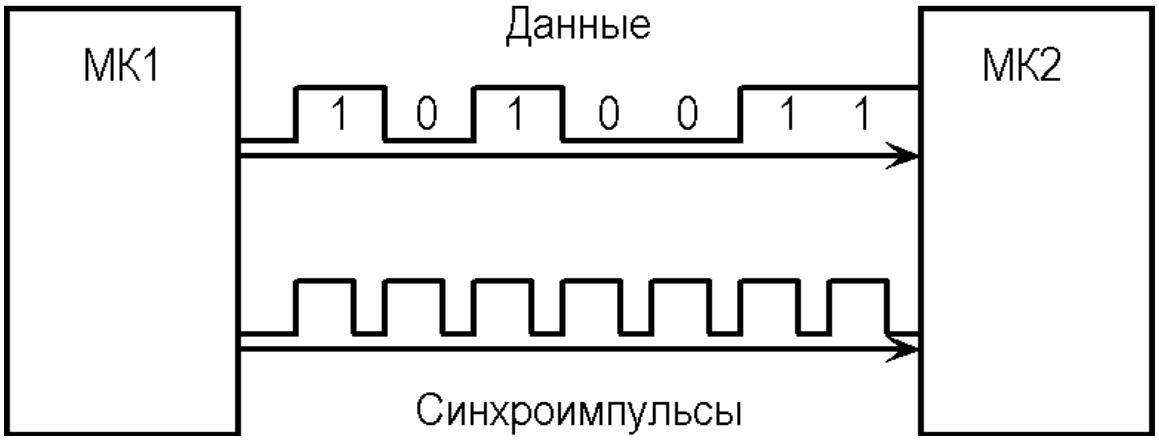


Рисунок 1 – Передача данных со стробирующим сигналом,
где МК1, МК2 – микроконтроллеры.

© В.В. Смирнов, Н.В. Смирнова. 2004

Использование механизма прерываний микроконтроллеров дает возможность организовать однопроводный интерфейс передачи данных, что высвобождает один разряд порта ввода-вывода.

Работа интерфейса основана на использовании недостатка механизма прерывания – фиксированной задержки времени реакции на входной сигнал (от 5 до 20 мкс). Традиционно представление логического ‘0’ и логической ‘1’ различается представлением уровня сигнала: ‘0’ – низкий уровень, ‘1’ – высокий уровень. Однако, прерывание микроконтроллера можно вызвать либо только отрицательным, либо только положительным фронтом сигнала. Поэтому в однопроводном интерфейсе логический ‘0’ и логическую ‘1’ необходимо представлять одинаковым уровнем, но различными по длительности. Пример реализации однопроводного интерфейса приведен на рисунке 2.

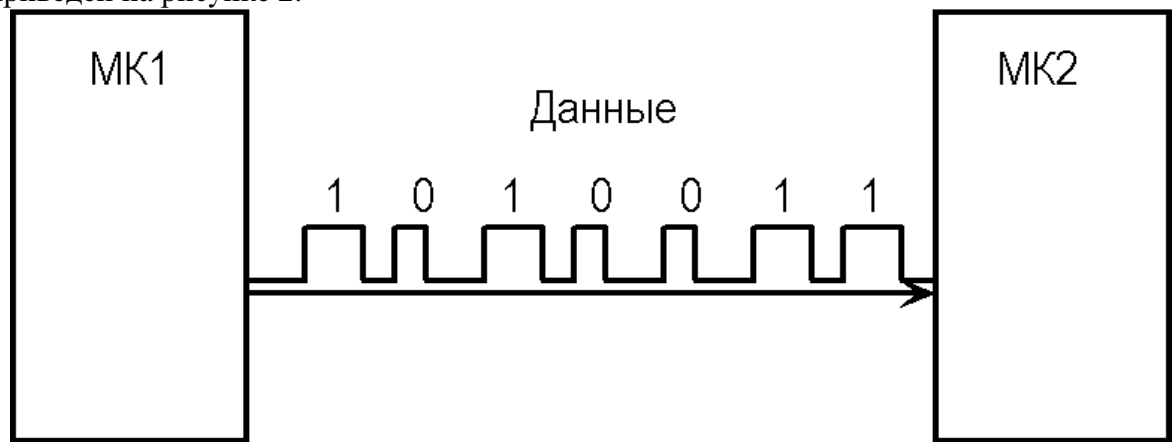


Рисунок 2 – Передача данных по одному проводнику

Принцип работы интерфейса представлен на рисунке 3 и заключается в следующем: При поступлении сигнала на вход прерывания микроконтроллера, микроконтроллер вызывает процедуру обработки прерывания с некоторой задержкой, обусловленной логикой работы внутреннего микропрограммного автомата. Если в процедуре прерывания считать сигнал с входа прерывания, то можно считать логическую ‘1’ , если сигнал еще установлен, или логический ‘0’, если сигнал снят. Целесообразно в процедуру обработки прерывания перед моментом считывания сигнала вставить задержку длительностью 2-4 мкс.

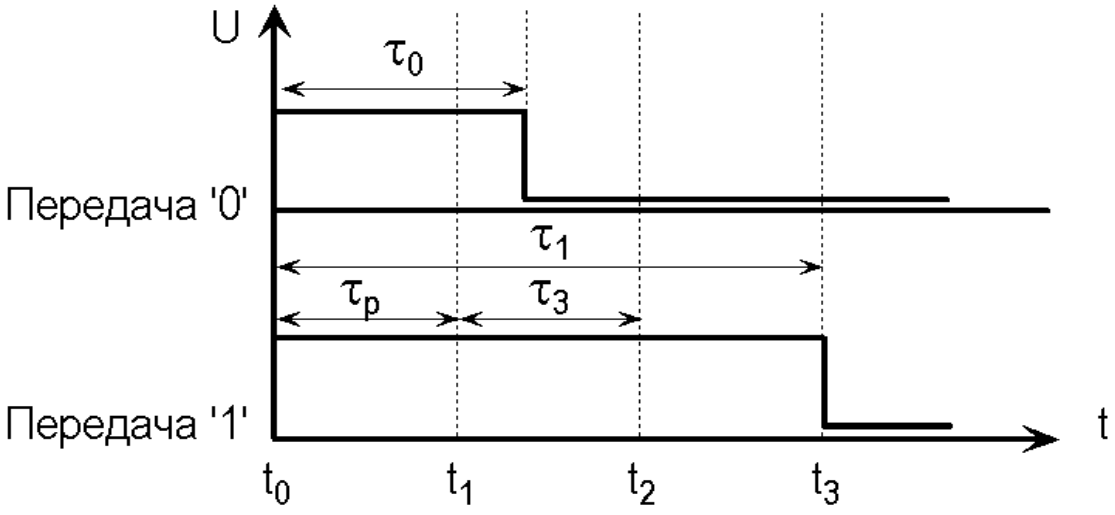


Рисунок 3 – Принцип работы однопроводного интерфейса передачи данных

где t0 – время установки входного сигнала;
t1 – время реакции прерывания на входной сигнал;
t2 – время считывания входного сигнала;
t3 – время снятия входного сигнала;
$\tau 0$ – длительность сигнала логического ‘0’;
$\tau 1$ – длительность сигнала логической ‘1’;
$\tau р$ – длительность задержки реакции прерывания на входной сигнал;
$\tau з$ – длительность задержки считывания сигнала относительно начала прерывания.

Условия достоверного определения сигнала определяется выражением (1):

$$\tau 0 < \tau р + \tau з \text{ – для двоичного ‘0’,} \quad (1)$$
$$\tau 1 > \tau р + \tau з \text{ – для двоичной ‘1’.}$$

Таким образом, использование механизма прерывания микроконтроллеров в режиме обмена информацией, позволяет организовать передачу данных по одному проводнику с минимальными затратами ресурсов микроконтроллера, таких, как память программ, оперативная память и разряды портов ввода-вывода.

Список литературы

1. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. - М.: Мир 1989. - 544 с.
2. Блэк Ю. Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы.- М.: Мир 1990.- 506 с.
3. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия.– Спб.: Питер, 2003. – 528 с.
4. Microchip Technology Incorporation. 18-Pin Flash/EEPROM 8-Bit Microcontrollers. Data Sheet. USA 1999г.

УДК 621-523.8

С.П. Плєшков, С.І. Осадчий, доценти, кандидати технічних наук
Кіровоградський національний технічний університет
А.В. Некрасов, доцент, кандидати технічних наук
Кременчуцький державний політехнічний університет

Математичні моделі електричних навантажень сільськогосподарського виробництва в автоматизованих системах контролю та управління

Проведено аналіз математичних моделей графіків електричних навантажень для сільськогосподарського виробництва. Побудовано імовірнісно - статистичну модель та визначено основні її характеристики.
математичні моделі, прогнозування електричних навантажень

В наш час розроблені математичні моделі графіків електричних навантажень для розв'язання ряду задач, наприклад, таких як визначення закономірностей електроспоживання, визначення витрат електричної енергії, оптимального оперативного та стратегічного прогнозування рівня електроспоживання в сільськогосподарському виробництві. Пошук рішення кожної з цих проблем, потребує побудови свого класу математичних моделей [1]:

1. Математичні моделі основані на побудові графіків електричних навантажень за технологічним процесом.
2. Математичні моделі що використовуються в методах визначення розрахункового навантаження. Ці моделі описують процес зміни навантаження на інтервалі часу під час реалізації максимуму навантаження (режим найбільш завантаженої зміни).
3. Математичні моделі, що використовуються для визначення статистичних характеристик графіків навантаженні на тривалих інтервалах часу.
4. Математичні моделі, що використовуються при прогнозуванні графіків навантажень та режимів електроспоживання.

Прогнозування електричних навантажень сільськогосподарського виробництва по результатам спостережень за електроспоживанням в реальному часі, потребує використання методів оптимального оперативного прогнозування, основу для використання яких складають моделі у вигляді кореляційних функцій і спектральних щільностей.

Для розрахунків електричних навантажень сільськогосподарського виробництва, широко використовують імовірно-статистичні моделі графіків навантажень [2]. Реальний процес зміни електричних навантажень у загальному, розглядається як нестаціонарний випадковий процес, у якому можна розрізнити добові, недільні і сезонні цикли, які повторюються. В той же час, аналіз експериментальних даних показує, що зміна навантажень на протязі доби може бути досить точно представлена сумою регулярної Рс та випадкової складової Рв(t). Регулярна складова має сенс математичного очікування випадкового процесу Р(t), тому:

$$P(t)=Pc+Pв(t)\ , \qquad (1)$$

© С.П. Плєшков, С.І. Осадчий, А.В. Некрасов. 2004

де *Pc* - постійне (середнє) сезонне навантаження;

Pв(*t*) - стаціонарний випадковий процес з нульовим математичним сподіванням та дробно - раціональною спектральною щільністю.

Стохастичний підхід до аналізу часового ряду з використанням виразу (1), дає змогу виділити регулярну та випадкову складову, котра моделюється стаціонарним випадковим процесом з нульовим математичним очікуванням [3]. В кожному разі, задача побудови імовірнісно - статистичної моделі полягає в тому, щоб на основі інформаційної бази, отриманої в результаті експериментальних досліджень, визначити наступні числові характеристики випадкового процесу P(t):

- щільність розподілу активного навантаження f(p);
- середнє активне навантаження вихідного графіка навантажень Pc;
- дисперсію навантаження вихідного графіка DP;
- середньоквадратичне відхилення σ;
- кореляційну функцію R(τ) ;
- спектральну щільність випадкового процесу Pв(t) - Spp(s).

На сьогодні відома досить велика кількість алгоритмів рішення поставленої задачі [4], які реалізовані у вигляді спеціальних функцій у пакетах таких прикладних програм: MathCad, MatLab, Statistica та інш.

Оскільки головною метою створення математичної моделі, є використання її у системах автоматичного управління електроспоживанням, то в якості математичного пакету для розрахунків використовувався MatLab 6.5. У відповідності з [5], щільність нормального розподілу активного навантаження визначається по реалізації $P(t)$ за досить тривалий період часу T:

$$f(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(p-p_c)^2}{2\sigma p^2}} . \qquad (2)$$

Середнє активне навантаження вихідного $P(t)$ графіка навантажень:

$$Pc = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T P(t)dt . \qquad (3)$$

Дисперсія навантаження вихідного $P(t)$ графіка навантажень:

$$DP = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T (P(t) - Pc)^2 dt . \qquad (4)$$

Середньоквадратичне відхилення визначається:

$$\sigma = \sqrt{DP} . \qquad (5)$$

Для оцінювання кореляційної функції зміни електричних навантажень протягом доби, при наявності послідовності вимірів $Pв(t_i)$ яка визначена на основі (1), для $t_i = i\Delta t$, та наявності N елементів, використовувався вираз [4]:

$$R(\tau_i) = R(i\Delta t) = \frac{1}{N-i-1} \sum_{p=0}^{N-i-1} P_в(p\Delta t) P_в[(p+i)\Delta t], i \in \overline{0,m} , \qquad (6)$$

де - $m=N/2$.

Оцінка (6) являється незміщеною, але може бути невідповідною із за обмеженості N, тому використовувалась процедура згладжування з допомогою кореляційних вікон Хеммінга:

$$\upsilon_m(i) = 0{,}54 + 0{,}46 \cos\frac{\pi \cdot i}{m} . \qquad (7)$$

Згладжена оцінка кореляційної функції, має наступний вигляд:

$$\widetilde{R}(\tau_i) = \widetilde{R}(i\Delta t) = \widetilde{R}(i) \cdot \upsilon_m(i) . \qquad (8)$$

Значення спектральної щільності потужності випадкового процесу може бути знайдене з використанням алгоритму бистрого перетворення Фур'є або на основі формули Блекмена-Тьюкі:

$$Spp(\frac{s \cdot i}{j2\pi}) = T\left[\widetilde{R}(0) + 2\sum_{i=1}^{m-1}\widetilde{R}(i)\cos(2\pi f_i T) + \widetilde{R}(m)\cos(2\pi f_m T)\right] . \quad (9)$$

Значення стандартного набору частот визначається із співвідношення

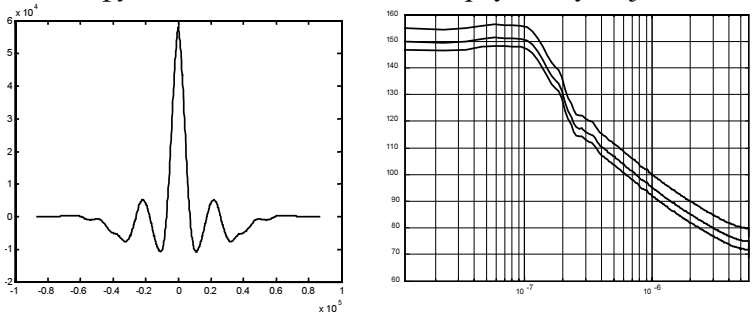
$$f_k = \frac{S_k}{j2\pi} = \frac{k}{2mT} \quad , \quad (10)$$

де T крок дискретизації процесу $Pв(t)$.

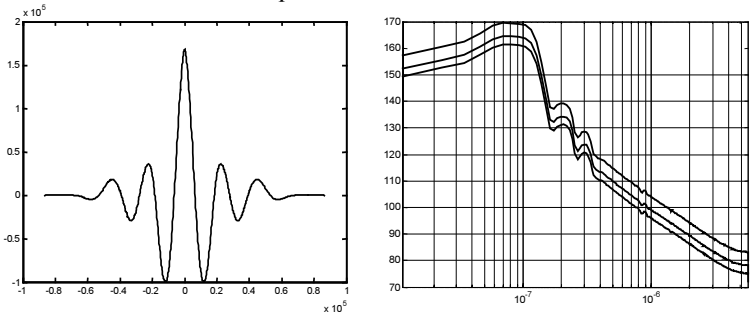
Алгоритм (6-10) прийнятний для стаціонарного ергодичного випадкового процесу. Обчислення значень кореляційних функцій змінної складової Рв(t) виконано для 3 основних енергоємних споживачів сільськогосподарського виробництва: молочнотоварні ферми (МТФ) - $Pв_1(t)$; ферми по відгодівлі великої рогатої худоби (ВРХ) - $Pв_2(t)$; свинотоварні ферми (СТФ) - $Pв_3(t)$.

Графіки отриманих оцінок кореляційних функцій для зимового періоду приведені на рис. 1.

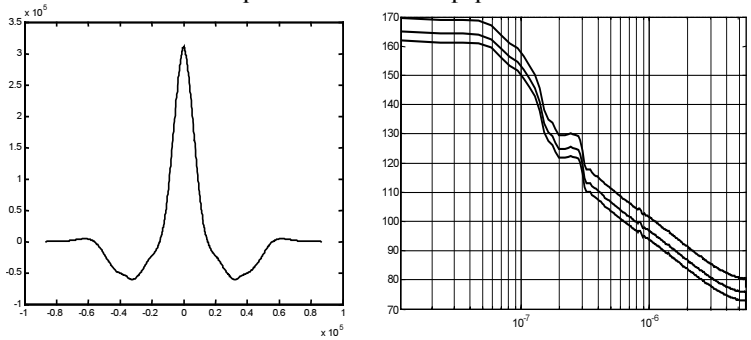
Криві спектральних щільностей (рис. 1), будувалися на основі кореляційних функцій в логарифмічному масштабі, що дозволяє легко виконати їх апроксимацію дробно-раціональними функціями комплексного аргументу S=jω.



Електроспоживання на МТФ



Електроспоживання на фермі ВРХ



Електроспоживання на СТФ

Рисунок 1 - Кореляційні функції та спектральні щільності добових графіків електроспоживання сільськогосподарського виробництва

В результаті обробки експериментальних даних, визначено що узагальнена структура $S(s)$, має наступний вигляд:

$$Spp(s) = \frac{\left|K(T_1 s + 1)(T_4 s + 1)\right|^2}{\left|(T_2 s + 1)(T_3^2 s + 2 d_3 T_3 ps + 1)\right|^2} \quad (11)$$

Введемо позначення: $S_{p1p1}(s)$ - спектральна щільність електроспоживання МТФ, $S_{p2p2}(s)$ - спектральна щільність електроспоживання ферм ВРХ, $S_{p3p3}(s)$ - спектральна щільність електроспоживання СТФ. Тоді значення параметрів K і Ti, мають вигляд як у табл. 1.

Таблиця 1 - Значення параметрів спектральної щільності електроспоживання сільськогосподарського виробництва

Параметр	K	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	$d3$
S_{p1p1}	15383,39	$3{,}3\cdot10^6$	$2{,}5\cdot10^6$	$1{,}72\cdot10^6$	$6{,}33\cdot10^5$	0,45
S_{p2p2}	21644	$2{,}5\cdot10^6$	$1{,}25\cdot10^6$	$2\cdot10^6$	$3{,}3\cdot10^5$	0,3
S_{p3p3}	64963	$6{,}33\cdot10^5$	$3{,}3\cdot10^6$	$3{,}3\cdot10^6$	$2{,}86\cdot10^6$	0,45

Значення Pc отримані в результаті експериментальних досліджень для зимового сезону, зведені в табл. 2. Зміни середньої потужності по сезонам, пояснюються більшими витратами електроенергії на технологічні процеси при низьких температурах повітря.

Таблиця 2 - Значення середнього електроспоживання у тваринницьких фермах

Назва ферми	Пора року	Середньодобове електроспоживання Pc, %
МТФ	Зима	84,833
Ферма ВРХ	Зима	61,63
СТФ	Зима	50,54

Отримані результати дають змогу зробити наступні висновки:

- добові графіки електроспоживання сільськогосподарського виробництва (МТФ, СТФ, ферми ВРХ) представляють собою адитивну суміш постійної регулярної складової Рс (табл. 2) і стаціонарного імовірного процесу;

- для вирішення задач прогнозування отримана модель процесу електроспоживання у вигляді дробно-раціональної спектральної щільності (11). Її параметри мало залежать від сезону, чим забезпечується можливість побудови оптимальної системи оперативного прогнозування в умовах невизначеності для найбільш тяжких технологічних умов.

Список літератури

1. Шидловский А.К. Расчеты електрических нагрузок систем електроснабжения промышленных предприятий.-М.:Энергоатомиздат, 1990. -128 с.
2. Будзко И.А., Левин М.С. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. -М.:Агропромиздат, 1985. -320 с.
3. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. -М.:Радиосвязь, 1987
4. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. -М.: Мир., 1982.-428с.
5. Плєшков С.П. Застосування математичних моделей електроспоживання сільськогосподарського виробництва в системах автоматичного контролю та управління //Вісник ХДТУСГ /Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України./ -Вип.6. Харків:ХДТУСГ, 2001. – С. 269-273.

УДК 631

В.Я. Воробєйчик, С.М. Гайдукова, доценти , канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Автоматизація контролю якості зерна у Франції

У статті проведено аналіз французької зернової галузі з точки зору забезпечення якості пшениці на стадіях приймання, збереження, переробки та комерціалізації. Зроблено огляд сучасної апаратури контролю показників якості та тенденції об'єднання інфрачервоних аналізаторів у комп'ютерні мережі.
зерно, контроль якості, прилади, мережі, французький досвід.

Повернення України в групу основних світових виробників зерна загострює конкуренцію на цьому ринку, де на перший план виходить проблема якості продукції. Одним із резервів підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції є приведення до світових норм апаратури контролю показників якості зерна та рівня автоматизації контролю. Досвід Франції може бути корисним.

Франція – лідер виробництва зерна в Європі

Франція вирощує 54 мільйони тон зерна на рік і по цьому показнику займає перше місце в Європі. В таблиці 1 приведені середні дані річного виробництва зерна країнами ЄС, в мільйонах тон:

Таблиця 1 - Виробництво зернових країнами ЄС, в мільйонах тон

Франція	Німеччина	Англія	Італія	Іспанія	Данія	Швеція	Австрія	Греція	Фінляндія	Бенілюкс	Ірландія	Нідерланди	Португалія	**ЄС**
54	40	22	20	11,5	9	4,8	4,5	4,4	3,3	2,4	1,8	1,5	1,4	**180**

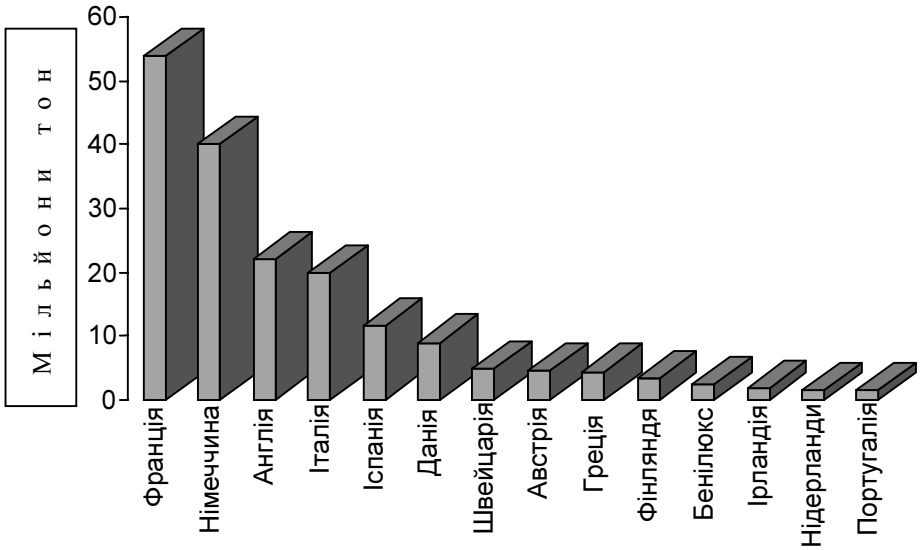


Рисунок 1 - Виробництво зернових країнами ЄС

© В.Я. Воробєйчик, С.М. Гайдукова. 2004

Виробництво зернових базується в основному на 3-х типах рослин: пшениця м'яких сортів, ячмінь, кукурудза.

Вирощена пшениця м'яких сортів використовується таким чином: 42 % - експортується, 23% - іде на виробництво кормів для тварин, 18% - перемелюється на муку, 9% - переробляється на крохмаль, 8% - різне інше використання. Мукомельна промисловість Франції значною мірою використовує пшеницю власного виробника. Лише 5-6 % пшениці, в основному твердих сортів, походило з країн Європейського Союзу. У 2002 році майже 95% імпорту прийшло з Росії та України, але ця пшениця, не зважаючи на відмінну якість, не була перероблена на муку, аби не підривати позиції французьких хліборобів.

Вироблене борошно споживається як на внутрішньому ринку (біля 4 млн. тон), так і експортується (біля 1 млн. тон). Обсяг експорту має тенденцію зменшення з майже 2 млн. тон у 1993 році до 0,74 млн. тон у 2002 році.

На внутрішньому ринку 69% муки йде на виробництво хліба та хлібобулочних виробів, 23% використовується у харчовій промисловості, 5% розфасовується в пакетиках, 3% - різне інше використання.

Виробництво хліба та хлібобулочних виробів майже на 70% здійснюється у дрібних приватних, часто сімейних, булочних-кондитерських. Індустріальне пекарство та виробництво тіста свіжого або замороженого лишається на рівні 20%. Решта виробів готується прямо в супермаркетах, притягуючи покупців ароматом свіжої випічки. Приблизно 1% випеченого хліба експортується. Це хлібні вироби за оригінальними рецептами, часто з пряностями, медом, горіхами тощо, спеціально упаковані так, що можуть зберігатися на протязі року. Споживання хліба у Франції зменшилося на 20% у порівнянні з 1985 роком, але залишається стабільним на протязі останнього десятиліття.

Франція щорічно експортує зерно та продукцію його переробки на суму більше 6 млрд. євро. Країни ЄС закуповують у Франції приблизно 80% загального експорту зернових.

Якість продукції стає основним елементом стратегії підприємства та елементом, який визначає вибір споживача.

Приймання зерна на елеваторах

У Франції зберігання зерна здійснюється на численних невеликих елеваторах, наближених до поля. Елеватори або приватні, або належать кооперативам фермерів. Наприклад, зерновий кооператив "Діжон-Сереаль" у Бургундії має 90 елеваторів загальною ємністю 550 тисяч тон.

Приймання зерна на елеваторі організовано таким чином:

Водій завчасно попереджує відповідального приймальника про прибуття, а по прибутті, передає йому документи про поставку, ставить вантажівку на автоматичні ваги. Оператор ваг уводить дані поставника, номер вантажівки або причепу, код зерна. Автоматично визначаються вага повного транспортного засобу, момент часу, відбирається проба зерна (у двох місцях кузова по всій його глибині) загальною вагою не менше 3 кг. Після швидкого аналізу, якщо немає зауважень, транспорт вивантажується, зважується порожній, а зерно, в залежності від якості, направляється приймальником у відповідну силосу. Автоматично друкується документ про поставку, кількість і якість зерна. Приймальник підписує документ і віддає один екземпляр водію, другий направляється в секретаріат елеватора, третій залишається в лабораторії контролю якості, де зберігатиметься і відібрана проба зерна.

В основі довіри між постачальником зерна й елеватором лежить об'єктивна система вимірювань. Аналіз якості зерна визначає такі параметри:

- Вологість зерна;
- Натуральну вагу;
- Вміст протеїну;
- Вміст домішок

Домішки поділяють на зернові ті не зернові. Зернові домішки складаються з:

- Зерна інших зернових та культивованих рослин: будь які зерна та їх фрагменти, що не належать до даного виду, а також зерна і фрагменти зернобобових та олійних культур;
- Екстракти решета 1,7 мм, крім вівса: за домовленістю, в цю категорію входять всі сторонні елементи та всі зерна зернових культур, які проходять крізь решето з видовженими закругленими щілинами шириною 1,7 мм і затримуються решетом із шириною щілин 1мм;
- Зерна з аномальним забарвленням у результаті пріння, але не знецінені;
- Зерна, пошкоджені шкідниками: гризунами або комахами, що видно неозброєним оком;

До не зернових відносяться нижчезгадані рослинні, мінеральні та тваринні елементи:

- Сторонні зерна, в тому числі шкідливі;
- Знецінені зерна;
- Інертні матеріали, що затримуються решетом із видовженими закругленими щілинами шириною 3,55 мм та всі елементи, які проходять крізь решето із шириною щілин 1 мм;

Аналіз також визначає:

- Пророслі зерна;
- Розламані зерна та осколки.

На кожному елеваторі є особа, відповідальна за забезпечення якості та, технік-метролог (часто в одній особі). В основі роботи лежить загальний план контролю: об’єкти контролю, періодичність, апаратура та інструменти, способи контролю, еталонування внутрішнє та зовнішнє, окремі інструкції тощо. В кооперативах, які об’єднують кілька елеваторів, існує служба якості продукції (2-3 особі), яка організовує контроль на місцях у відповідності із загальною стратегією якості підприємства.

Контроль якості на зернопереробних підприємствах

Великий млин у Діжоні виробляє 120 000 тон муки на рік (біля 550 тон на день). Асортимент складається з приблизно 20 сортів муки для випікання хліба та більше ніж 50 мучних сумішей для виробництва особливих хлібобулочних виробів, а також круасанів, бріошей, бісквітів, кексів тощо. Продукція сертифікована на відповідність стандарту якості ISO 9001. Значна частина продукції продається з маркою « біо », що означає відповідність повному циклу екологічно чистого виробництва від вирощування зерна до випікання хліба.

Кількість працюючих на всьому підприємстві : 50 осіб, із них 5 працюють у лабораторії контролю якості.

В арсеналі лабораторій зернопереробних підприємств є обладнання для проведення таких аналізів:

- Вологість пшениці та муки
- Зольність пшениці та муки
- Клейковина волога та клейковина суха муки та пшениці
- Індекс падіння муки та пшениці
- Гранулометрія муки
- Альвеограма муки

- Маса 1000 зерен пшениці
- Реалізація пробного помелу
- Графік амілограми муки
- Тест осадження муки
- Питома вага пшениці
- Тест присутності аскорбінової кислоти в муці
- Тест хлібовипікання з муки
- Тест хлібовипікання з пшениці, базовий
- Тест присутності кислоти з допомогою діхлорфенола
- Ручне визначення вологої клейковини в муці
- Інфрачервоний аналіз муки приладом Inframatic 8600
- Інфрачервоний аналіз пшениці приладом Inframatic 8600
- Мікробіологічний аналіз муки
- Мікробіологічний аналіз пшениці
- Контроль BVF круасанів, бріошей, кексів
- Реоферментометрія
- Вміст крохмалю в муці
- Тест Zeleny
- Індекс Hagberg
- Вміст азоту методом Kjeldhal
- Вміст соляної кислоти

Якість харчових продуктів є поняття комплексне і таке, що розвивається. Воно вбирає в себе різні царини, такі як санітарна гарантія, смакові та гастрономічні якості, а також законність комерційних операцій та довіру між постачальником та клієнтом. В розвинутих країнах із насиченим ринком якість стає основним елементом стратегії підприємства.

Апаратура контролю якості

Відбір проб при прийманні зерна

Перший крок до правильного аналізу - це відбір репрезентативного зразка. Для цього розроблені автоматичні пневматичні зонди Pick-up на принципі розрідження повітря. Час відбору проби телескопічним маніпулятором – 6 секунд. Об'єм проби регулюється від 2 до 4 літрів. Привод електричний трифазний 380 В, потужність 4 кВт. Аналогічні зонди Prevrac мають гравітаційний принцип заповнення. Постачальник Tripette & Renaud.

Вологоміри зерна

Прилади 1 класу мають максимальну допустиму абсолютну (в процентах умісту води) похибку $\Delta W=0.7\%$, якщо вологість $W\leq 10\%$, та $\Delta W=0{,}03W\%+0{,}4\%$, якщо $W>10\%$. Прилади 2 класу мають максимальну допустиму абсолютну похибку $\Delta W=0.8\%$, якщо вологість $W\leq 10\%$, та $\Delta W=0{,}04W\%+0{,}4\%$, якщо $W>10\%$. Інші вологоміри не класифікуються. За способом використання вологоміри поділяють на лабораторні, портативні та потокові:

Лабораторні вологоміри:

Aqua-TP . Вимірює одночасно вологість, питому вагу та температуру зерна. Принцип дії: ємкісний, із вібраційним ущільнювачем. Дозволений для комерційних операцій. Клас 1 або 2. Час вимірювання 20 секунд. Пам'ять на 1000 результатів.

Можливість до 128 калібрувань для всіх типів зернових. Рідкокристалічний індикатор. Передбачена передача даних на комп'ютер . Живлення 220 В 50 Гц або від джерела 12 В. Вага нетто 9,6 кг.

ХМ120 або ХМ60. За принципом дії - дессікатор (висушувач). Проба, розташована на вагах, швидко висушується галогеновими або інфрачервоними лампами

Granomat. Вимірює одночасно вологість, питому вагу та температуру зерна. Принцип дії ємкісний, (діелектрична проникність не розмолотих зерен). Дозволений для комерційних операцій. Клас 2. Об'єм проби 600 мл. Можливість до 100 калібрувань для всіх типів зернових. Рідкокристалічний індикатор. Умонтований принтер. Передбачена передача даних на комп'ютер . Живлення 220 В 50 Гц. Вага 18 кг. Габарити: 420х390х360 мм.

Автоматичний вологомір ТМ. Визначає вологість та питому вагу зерна за 20 секунд.. Клас точності 1. Допущений до комерційних розрахунків. Принцип дії ємкісний. 128 калібровок у пам'яті. Клавіатура та індикатор розраховані на 10 мов. Живлення 220 В 50 Гц. Вага 14 кг. Габарити: 450х430х260 мм.

НОН-Express. Фірма Pfeuffer випускає вологоміри з 1947 року. Варіанти НЕ 50, НЕ 60, НЕ 90. Висока точність забезпечується попереднім розмелюванням зерна з утворенням однорідної маси. В деяких країнах рекомендовано як еталон для калібрувань вологомірів. В Німеччині є стандартом при торгівельних операціях із зерновими. Автоматична корекція температури. Можливість більше 100 калібрувань для всіх типів зернових.

GAC 200. Лабораторний прилад виробництва DYCKEY-JOHN Corporation. Калібрований на 32 типи зерна. Час вимірювання 15 с. Друкує вологість та температуру зерна. Маса проби 500 г. Орієнтовна ціна приладу 1800 євро.

Фірма Bio-Tests & Industries випускає гамму вологомірів: G MK-300 та G MK-303 для зерна, G MK-503 для насіння та інші. Діапазон вимірювання вологості 5-40%, Точність 0,5% (<30%) та 0.7% (>30%). Термокомпенсація автоматична. Рідкокристалічна цифрова індикація. Живлення 220 В 50 Гц або 4 батарейки по 1,5 В. Вага 3,1 кг. Габарити: 250х175х65 мм.

Продовжується випуск вологомірів під знаменитою торгівельною маркою Brabender. 10 проб зерна по 10 г розташовуються на вагах у сушильній печі, яка нагрівається імпульсним струмом. Вимірюється втрата ваги. Від 40 до 120 визначень вологості за 8 годин. Живлення 220 В 50 гц, потужність 1200 Вт. Висота приладу 850 мм, діаметр 550 мм. Вага 35 кг.

Аналогічно, але швидше (за принципом дессікації у термостатичній камері) працює пристрій MLI 1000. Дві проби паралельно висушуються за 10 хвилин. Потужність 600 +300 Вт. Габарити 590х435х215 мм. Вага 25 кг.

Дессікатор МА 30, на відміну від попереднього, обладнаний інфрачервоним нагрівачем радіального типу з можливістю регулювання температури від 40 до 160°С кроками по 5°С.

Портативні вологоміри:

WILLE 55. Портативний прилад. Діапазон вимірювань від 5 до 40%. Середня похибка 0,5%. Калібрований на 16 типів зерна. Живлення від батарейки 9 В. Час вимірювання кілька секунд. Варіант WILLE 65 додатково контролює температуру зерна зовнішнім зондом.

TEST-O-GRAIN. Запрограмований на 10 основних типів зерна. Користувач може сам додати іще три. Живлення від батарейки 9 В, Розміри пристрою: 160х75х60 мм. Вага 300 г.

Потокові вологоміри:

HUMISTAR – вологомір, що монтується безпосередньо в потоці зерна так, що частина цього потоку проходить крізь вимірювальний конденсатор. Ємність конденсатору залежить від діелектричної проникності зерна, а вона, у свою чергу, – від його вологості. Це дозволяє автоматично керувати процесами висушування або зволожування зерна. Діапазон вимірювання вологості від 1 до 50%. Точність від 0,1 до 0,5%. Пам'ять на 200 калібровочних кривих. Можливість збереження поточної інформації на жорсткому диску.

AQUATRON – регулятор вологості зерна, який складається з вологоміра (аналогічний пристрій з тим же принципом дії, що й попередній) та регулятора витрат води для зволожування зерна перед розмелом. Особлива конструкція забезпечує постійне заповнення вимірювального конденсатора зерновим потоком, паралельним основному. Таким чином, результат вимірювання відповідає дійсному вмісту вологи в донний момент.

Зонди MMS – призначені для вимірювання вологості будь яких сипучих матеріалів, в тому числі в потоках зерна. Принцип дії: високочастотне вимірювання ємності конденсатору накладного типу.

Термометрія

Ці прилади дуже поширені. Термодатчики вбудовуються в інші прилади, аби врахувати вплив температурних змін на їх показання. Наприклад, кожний сучасний вологомір має термокомпенсацію. Є термозонди (thermo grains/fourrages, Baratte) переносні або фіксовані, автономні або такі, що підключаються до читаючого чи показуючого пристрою (Agitherm TR 52, AG 8200, Serdia). Контролери можуть опитувати більше 2000 термодатчиків, які працюють у діапазоні температур від – 40 до + 120 °С із точністю до 0,1°С. Вони керують автоматичною системою аерації, забезпечують безпеку сховищ (завдяки ранньому виявленню точок самозігрівання зерна), контролюють якість зберігання зерна, ведуть реєстрацію температурних змін із часом, виконують їх статистичний аналіз, здійснюють автоматичну повірку та еталонування термодатчиків.

Реологічний аналіз

Альвеограф цифровий CHOPIN MA 95 – міжнародний загальновизнаний апарат, який відповідає стандарту ISO, дозволяє відбирати пшениці та поліпшувати борошна в залежності від їх кінцевого призначення. Наприклад, для випікання хліба, бісквітів та гамбургерів потрібні борошна із суттєво різними характеристиками (альвеограмами). Вимірює тягучість, розтяжність, еластичність та хлібопекарську силу борошна.

Віскозиметр VISCOGRAPHE BRABENDER – стандартний вимірювач в'язкості та желатинізації крохмалю шляхом розрізання в нагрітій чаші крохмального клейстеру та реєстрації змін в'язкості в залежності від температури та часу.

Тест Zeleny

SEDIMAT – прилад, в якому реалізується стандартний метод визначення показника осаду пшениці. Операції методу: помел муки, струшування розчину муки в лактичній кислоті, визначення об'єму осаду розчину. Тест Zeleny є загальним показником кількості та якості протеїнів.

Вміст клейковини

GLUTOMATIC – прилад, який автоматично, за 6 хвилин, визначає вміст клітковини в борошні. Операції: формування тіста з 10 г борошна, вимивання в розчині

солі та формування кульки, віджимання центрифугою та зважування для визначення проценту вологої клейковини, висушування для визначення проценту сухої клейковини.

Інфрачервоні аналізатори зерна (борошна)

Infratec, Inframatic, Pro TR (фірми-постачальники Foss-France, Tripette&Renqud та Triton). Принцип дії оснований на аналізі спектру поглинання або відбивання електромагнітних хвиль (променів) ближнього інфрачервоного (ІЧ) діапазону довжиною 780 – 2500 нм. Прилад складається з ІЧ-джерела, вимірювальної ячейки, набору фільтрів або монохроматора, ІЧ-детектора або аналізатора спектру, перетворювача, блока живлення. Ячейка заповнюється зерном, ІЧ-промені проходять крізь неї (іноді використовується відбивання променів).

Обробляючи інформацію, отриману на десятках довжин хвиль, цей лабораторний прилад дозволяє одночасно вимірювати кілька параметрів зерна (муки): вологість, вміст протеїну, клейковину, індекс Zeleny, індекс Hagberg, узагальнений покажчик альвеометрії. Проба загальною масою приблизно 350 г автоматично, послідовними порціями по 35 г, заповнює ячейку. Після 10 вимірювань прилад друкує середній результат. Час повного аналізу: 40 секунд. Точність вимірювання вмісту протеїну 0,3%. Прилад відноситься до 2-го класу точності. Вага апарату 35 кг. Розміри 590х470х375. Живлення 220 В 50 Гц, 125 Вт.

Як розвиток цього перспективного напряму, з’явилися дослідні зразки портативних ІЧ-аналізаторів, а один апарат встановлено безпосередньо на зернозбиральному комбайні.

ІЧ-прилади об’єднуються в комп’ютерну мережу “Agroreso” або ”Infranet” або іншу (через телефонний кабель).

Комп’ютерна мережа «AGRORESO »

Зараз мережа об’єднує біля 200 користувачів з усіх регіонів Франції, в розпорядженні яких знаходиться 1100 апаратів ІЧ-аналізаторів якості зерна. Правильність функціонування, повторюваність, відтворення та стабільність результатів вимірювання кожного апарату перевіряються щоденно з центрального комп’ютера. Один раз на рік під час збирання врожаю зернових, прилади калібруються на місці еталонним зразком зерна, щоби враховувати зміни, які приніс новий сезон.

Подібні мережі існують майже в кожній країні ЄС. Розвиток цього нового та перспективного методу поки що стримується високою ціною інфрачервоного пристрою: 30 тисяч євро. До того ж щорічно треба мінять лампу, джерело ІЧ-випромінювання, яка коштує 100 євро. Але, як тільки Франція ввела субсидії на купівлю апаратів, кількість споживачів за один 2000-й рік збільшилась вдвічі.

Комп’ютерна програма « QUALITEL »

Програма призначена для відділів якості та метрології підприємств. Вона реєструє всі вимірювальні засоби, прилади, інструменти на всіх ділянках підприємства, Планує та фіксує факти їх придбання, використання, повірки, еталонування, ремонту, заміни, руху між ділянками, списання тощо.

Втручання людини для внесення змін заднім числом неможливе. Таким чином підтримується висока дисципліна роботи служби якості. Гасло співробітників: “Записуємо, що маємо зробити. Робимо, що записано. Записуємо, що зроблено”.

Вартість якості

У країнах ЄС сформувались насичені ринки. Проблема виробників не в тому

щоби випустити певну продукцію, а в тому, щоби її продати. Коли покупець немає турботи щодо кількості продукції, для нього на перший план виходять її якість, натуральність, харчова цінність. Це негайно враховує виробник.

З'явилися товари, якість яких підтверджується та захищається спеціальними знаками і марками. Наприклад, марка "біо" або "Agriculture biologique" на хлібобулочних виробах означає відповідність повному циклу екологічно чистого виробництва від вирощування зерна до випікання хліба. Це хліборобство без застосування хімічних засобів захисту рослин, хімічних добрив, прискорювачів росту, генетичних модифікацій тощо. Такий підхід вимушує фермера працювати абсолютно прозоро під наглядом управління сільського господарства свого департаменту та погодитись на контроль своєї продукції визнаними органами сертифікації. Фермер має вести облік усіх первинних матеріалів, насіння, сировини, дотримуватися сівозмін, застосовувати органічні добрива, біологічні методи боротьби із шкідниками і таке інше.

При цьому урожайність знижується, а трудомісткість зростає. Тому ціни на «біологічний» хліб у кілька разів вищі ніж на звичайний.

Якість дорого коштує. Це стосується також якості вимірювань. В таблиці 2 приведені тарифи аналізів для однієї проби пшениці, опубліковані офіційним сертифікованим органом метрології:

Таблиця 2 - Вартість аналізу однієї проби в євро

Вид аналізу	Тариф	Вид аналізу	Тариф
Підготовка проби	23	Реоферментометрія	217
Вологість зерна	88	Альвеограма	147
Інфрачервоний аналіз	66	Клейковина	147
Протеїн методом Kjeldhal	108	Тест хлібопекарської якості	583
Зольність	82	Питома вага (натура)	75
Тест Hagberg	91	Вага 1000 зерен	93
Тест Zeleny	108	Домішки (повний аналіз)	210
Целюлоза	115	Мікотоксини	648

Комерціалізація зерна

Французька пшениця поділяється на чотири класи (E,1,2, та 3) за трьома основними технологічними критеріями: уміст протеїну, хлібопекарська сила (площа під лінією альвеограми), індекс падіння Hagberg.

Таблиця 3 - Класифікація пшениці у Франції

Клас	Протеїн	Хлібопекарська сила (10^{-4} Дж)	Індекс Hagberg, с
E	≥ 12 %	≥ 250	≥ 220
1	11 – 12,5%	160 - 250	≥ 220
2	10,5 – 11,5 %	За контрактною специфікацією	≥ 180
3	< 10,5 %	Не регламентується	Не регламентується

Франція експортує майже половину вирощеної пшениці. Контрактні норми щодо якості м'якої пшениці для хлібопекарських цілей представлені в таблиці 4. Передбачається, що зерно не має цвілі, живих шкідників, токсичного насіння, чогось незвичайного.

Таблиця 4 - Технічні характеристики м'якої пшениці для приготування борошна

	Вологість, %	Питома вага, кг/т	Домішки, %				Протеїн, %	Індекс Hagberg, с	Індекс Zeleny
			Пророслі зерна	Уламки зерен	Зернові доміш.	Різні домішки			
Норма	14	760	1	2	1,5	0,5	11,5	230	25
Максимум	14,5	-	4	5	7	3	-	-	-
Мінімум	-	730	-	-	-		10,5	220	22

Відхилення від норми враховується системою премій або знижок. Наприклад, при зменшенні вологості в діапазоні від 13,4 до 10% премія складає 0,1 є/т на кожні 0,1 %, і навпаки, при збільшенні вологості від 14,1 до 14,5% знижка ціни складає 0,2 є/т на кожні 0,1 %. Можлива помилка у визначенні вологості пшениці всього на 0,1% при угоді на 10 тисяч тон пшениці коштуватиме 1000 євро. Тому при комерційних операціях особлива увага приділяється апаратурі контролю якості, яка повинна бути сертифікована, а сам орган контролю має бути міжнародно визнаним.

Наведений у статті аналіз нових підходів в автоматизації контролю якості зерна може бути корисним розробникам вимірювальної апаратури. Приведення показників якості та рівня автоматизації контролю до світових норм сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної зернової галузі та зближенню позицій країн виробників зерна у контексті європейської інтеграції України.

УДК 658.011.56

В.О. Кондратець, проф., канд. техн. наук, О.М. Сербул, асп.
Кіровоградський національний технічний університет

Оптимізація структури засобів управління кульовим млином з циркулюючим навантаженням

У статті приведені результати досліджень по пошуку оптимальної структури засобів управління роботою кульового млина, що працює в замкнутому циклі з спіральним механічним класифікатором. Встановлено, що оптимальна структура засобів управління включає оператора та чотири локальні автоматичні системи. Обґрунтована структура засобів управління не розробленої нині системи стабілізації співвідношення руда/вода. Показана доцільність комп'ютерної інтеграції обладнання та керування одним оператором усим комплексом устаткування.
оптимізація структури, співвідношення руда/вода, людино-машинна система

Видобуток і збагачення залізної руди не ефективні без подальшого розвитку і удосконалення всіх процесів обробки мінеральної сировини, зокрема процесів подрібнювання. Подрібнювання є одним з основних технологічних процесів на залізорудному збагачувальному комбінаті, оскільки забезпечує продуктивність, степінь розкриття мінералу, вилучення цінного компоненту та вміст його в концентраті, а не в хвостах у вигляді втрат. При будуванні збагачувальної фабрики значна частина витрат припадає на цех подрібнювання, а під час її експлуатації велика кількість металу та майже 50 % енергетичних затрат витрачаються на процес подрібнювання [1]. Для комбінату, який переробляє біля 30 млн. т. руди на рік, річне споживання енергії перевищує 1,5 млрд. кВт год. [2]. Ці дані свідчать про важливість оптимізації процесу подрібнювання руди.

Подрібнювання руди здійснюють в стержньових і кульових млинах, а також в млинах мокрого самоподрібнювання. Найбільшого поширення в промисловості отримали подрібнювальні агрегати, що містять кульовий млин і спіральний механічний класифікатор, які працюють в замкнутому циклі. В такій схемі подрібнюваний матеріал з млина надходить у механічний спіральний класифікатор, який поділяє його на злив і піски. Злив надходить на збагачення, а піски повертаються на доподрібнювання, причому подрібнюваний матеріал може проходити через млин багаторазово, доки не досягне крупності зерен, які розвантажуються в злив.

Найвища ефективність подрібнювання руди в кульовому млині можлива лише при певних умовах його роботи. Знайдені і встановлені умови ефективної роботи млина легко змінюються під дією численних збурюючих впливів і, як наслідок, агрегат переводиться у стан, що не відповідає оптимальному, погіршуючи якість продукту та перевитрачаючи енергетичні і матеріальні ресурси.

Керування кульовим млином, як головним об'єктом рудозбагачувальних фабрик, на перших етапах розвитку даної галузі промисловості здійснювалось вручну. Зрозуміло, про оптимальність процесу тут мову вести не можливо. Згодом були розроблені певні пристрої для контролю деяких технологічних параметрів. Це покращило характеристики процесу, але не суттєво. Тому наступним етапом стала автоматизація технологічних процесів в кульових млинах [3], яка забезпечила покращення результатів роботи об'єкта, але вони залишались ще далекими від бажаних. Тому активно вивчаються характеристики кульового млина як керованого об'єкта. Зокрема розробляються методи і визначаються статичні та регулювальні

© В.О. Кондратець, О.М. Сербул. 2004

характеристики кульового млина [4]. Досліджується динаміка даного об'єкта та систем керування в цілому [5]. На підставі цих досліджень здійснено поглиблення розробок. Розроблені інформаційні засоби з покращеними характеристиками та принципи побудови локальних автоматичних систем [6]. Як попередню, так і подальшу розробку систем автоматичного управління даним об'єктом продовжував ряд авторів. З узагальненого викладення даної проблеми [7] видно, що вона залишається до кінця не розв'язаною, хоч розроблені окремі зразки систем автоматичного керування різними технологічними процесами, які використовуються на рудозбагачувальних фабриках. З останніх публікацій з даного напрямку досліджень також витікає, що автоматично забезпечується висока надійність технологічного обладнання та здійснюється його комп'ютерна інтеграція разом з процесами, які відбуваються в ньому. Впроваджуючі організації також не можуть запропонувати засобів, що розв'яжуть дану проблему, оскільки пропонують набір різних локальних систем автоматичного керування на вибір замовника, а не певне найкраще рішення для даного процесу. Питання ж оптимізації одного з самих важливих об'єктів залишається не розв'язаним.

Оскільки в кульових млинах, які розповсюджені дуже широко, продовжують перевитрачатись матеріальні та енергетичні ресурси, проблема, яка розглядається, потребує розв'язання. Зважаючи на відсутність інших технологій та величезну вартість вказаних ресурсів, дана робота спрямована на реалізацію напрямку "Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі", передбаченого Законом України від 11 липня 2001 року № 2623 – III "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки".

Зважаючи на те, що вказана проблема тривалий час не вирішується, на даному етапі досліджень доцільно повернутись до розгляду питань управління кульовим млином як керованим об'єктом в цілому, використавши накопичений досвід, результати теоретичних та експериментальних напрацювань. З загальної проблеми слід виокремити розробку оптимальної структури управління об'єктом в цілому та тих локальних систем, які взагалі ще не були реалізовані на практиці. Серед таких засобів виділяється система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульовому млині. Обґрунтована оптимальна структура управління кульовим млином дозволить найкраще в заданих умовах реалізувати даний процес. Оскільки за таких умов буде надана можливість в кожній конкретній ситуації підтримувати режим роботи кульового млина наближеним до оптимального зі зменшенням втрат, тема даної статті є актуальною.

Ціллю даних досліджень є обґрунтування оптимальної структури засобів управління кульовим млином в цілому та розробка оптимальної структури засобів підтримання співвідношення руда/вода. Дослідження передбачається здійснити шляхом аналізу характеристик керованого об'єкта та структур управління, які включають лише оператора, оператора з засобами контролю, засобів комплексної автоматизації та людину-оператора з технічними засобами у вигляді керованого об'єкта і локальних автоматичних систем у різному їх поєднанні.

Розглянемо кульовий млин як керований об'єкт. Він буде мати вихідні величини $X_{вих.i}$ та три групи вхідних величин – безпосередньо вхідні величини $X_{вх.i}$, управляючі величини Θ_i та збурюючі – F_i (рис. 1, а). Рівень вихідних величин визначається режимом процесу, характеризує його стан. Вихідні величини формуються як наслідок сумарної дії вхідних, управляючих і збурюючих. До вихідних величин звичайно відносять лише характеристики отримуваної продукції – це витрати твердого в розвантаженні млина $X_{вих.Р}$, витрата готового продукту $X_{вих.П}$, густина пульпи $X_{вих.Г}$. Вихід регульованого об'єкта також характеризують параметри стану $X_{ст.i}$, які зв'язані з характеристиками режиму процесу. В даному випадку параметрами стану можуть

слугувати – акустичний сигнал $X_{ст.А}$, який створює млин, а саме такі його параметри, як амплітуда і частота, вібраційні коливання $X_{ст.К}$, що виникають при роботі, та сила струму або потужність $X_{ст.П}$, які споживаються з електричної мережі приводним двигуном кульового млина.

Вхідні величини $X_{вх.і}$ характерні тим, що їх значення можна виміряти, але можливість впливу на них відсутня. Звичайно їх значення не залежать від режиму процесу. В якості узагальненої вхідної величини тут виступає контрольований склад вихідної руди, який не піддається корегуванню в процесі експлуатації. Він характеризується окремими складовими – крупністю сипкого матеріалу $X_{вх.К}$, його подрібнюваністю $X_{вх.П}$, вологовмістом $X_{вх.В}$.

Управляючі величини дозволяють здійснювати прямий вплив на керований об'єкт у відповідності з вимогами до керування. Якраз їх наявність забезпечує управління процесами в об'єкті. У кульовому млині управляючими величинами є продуктивність по вихідному живленню $\Theta_Ж$, витрати води в агрегат $\Theta_В$, швидкість обертання барабана $\Theta_О$, кульове навантаження $\Theta_К$.

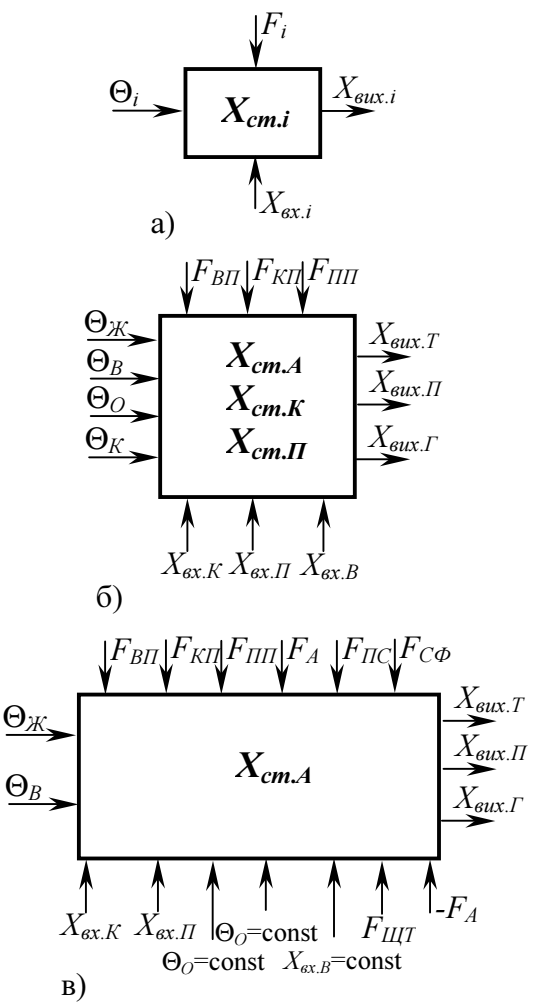


Рисунок 1 – Схематичне зображення кульового млина як керованого об'єкта:
а – у загальному зображенні величин;
б – у функціональному зображенні величин;
в – з врахуванням прийнятих особливостей

До збурюючих відносять ті величини, значення яких здебільшого випадковим чином змінюються з плином часу і які порушують зв'язок між вихідними і вхідними величинами, негативно впливаючи на процеси. Вони здебільшого недоступні для вимірювання. В подрібнювальному агрегаті, що розглядається, збурюючими величинами будуть зміна витрат пісків $F_{ВП}$, їх крупності $F_{КП}$, подрібнюваності $F_{ПП}$.

З врахуванням відміченого, схематичне зображення кульового млина як керованого об'єкта прийме вигляд, зображений на рис. 1, б. Наведена схема потребує певних уточнень. Вихідні величини $X_{вих.Р}$, $X_{вих.П}$, $X_{вих.Г}$ завжди розглядають. Параметри стану керованого об'єкта звичайно всі до уваги не приймають, оскільки вони мають аналогічний характер і в основному визначають завантаження кульового млина. Найбільше розповсюдження отримали системи визначення стану керованого об'єкта по акустичним характеристикам звукового сигналу кульового млина. Тобто, враховують $X_{ст.А}$. В такому випадку з'явиться додатковий збурюючий фактор $F_А$, виражений в шумових характеристиках оточуючого середовища. Здебільшого даний сигнал компенсують, що рівноцінно прикладанню такого ж впливу, як вхідного, з оберненим знаком, тобто – $F_А$. Зі зміною вологовмісту $X_{вх.В}$ вихідного матеріалу в кульовому млині будуть відбуватись перехідні процеси, які порівняно мало впливають на стан кульового млина. Зважаючи на те, що даний параметр для конкретного родовища є величиною практично постійною, при керуванні об'єктом його можна не враховувати, поклавши

$X_{вх.В}$ = const. В якості управляючих на практиці використовують витрати вихідної руди $\Theta_Ж$ та витрати води $\Theta_В$. Швидкість обертання барабана млина $\Theta_О$ та кульове навантаження $\Theta_К$ традиційно приймають незмінними. Для цього використовують синхронний електропривод та стабілізацію маси куль в барабані млина, хоч зміна частоти обертання останнього є достатньо перспективним підходом при управлінні процесом подрібнювання руди, оскільки дозволяє без порушення живлення і подачі води стабілізувати процес, компенсуючи коливання характеристик матеріалу на вході. На практиці підтверджена висока ефективність управління швидкістю обертання кульового млина, однак широке впровадження регулювання процесу подрібнювання зміною цього параметра ускладнено, оскільки потребує заміни існуючого електропривода регульованим. Така заміна, крім того, пов'язана з значними капітальними витратами та потребує додаткових виробничих площ, які відсутні на діючих підприємствах. Ще не доведена ефективність такого підходу і на створюваних підприємствах в наслідок великої вартості і складності регульованого привода на великі потужності. Оскільки $\Theta_О$ = const і $\Theta_К$ = const вони переходять відповідно визначенню до групи вхідних величин. Там же залишаються $X_{вх.К}$ і $X_{вх.П}$, які стабілізувати не має можливості.

Група збурюючих величин поповниться експлуатаційними факторами. Характеристики подрібнюючого середовища в наслідок зносу куль з плином часу змінюються. Зміна відбувається в розмірах куль та їх формі, що впливає на процес подрібнювання руди. Розмір куль $F_{РК}$ та їх форма $F_{ФК}$ поступово неперервно змінюються. Розмір куль зменшується від деякого максимального значення до величини, коли такі тіла потрапляють в розвантаження млина. Форма куль в наслідок нерівномірності міцнісних характеристик матеріалу може бути практично довільною в межах можливих змін. Враховуючи нові поповнення куль, подрібнююче середовище являє собою весь діапазон зміни розміру тіл від мінімального до максимального значення, що відповідає прийнятим вихідним параметрам. Причому, неможливо стверджувати, що співвідношення різних фракцій подрібнюючих тіл є певним і підтримується незмінним, оскільки практично неперервно коливаються навантаження рудою, її міцність та крупність. Це також стосується і форми подрібнюючих тіл. Таким чином, характеристики подрібнюючого середовища є складними, змінними в часі і такими, що практично недоступні для вимірювання. Внаслідок того, що немає можливості врахувати окремо $F_{РК}$ і $F_{ФК}$, охарактеризуємо подрібнююче середовище одним символом $F_{ПС}$. На процес подрібнювання також впливають щільність і твердість куль. Дослідним шляхом встановлено, що зміна продуктивності кульового млина прямо пропорційна щільності куль. Покращення умов подрібнювання спостерігається і при підвищенні твердості куль [1]. Однак ці параметри матеріалу відомі, їх можливо врахувати і в процесі роботи вони змінюватись не будуть. Переходячи з одних куль на інші, звичайно, їх властивості треба враховувати. Тому дані параметри можна віднести до групи вхідних величин, які є змінними константами, позначивши одним символом $F_{ЩТ}$.

До факторів експлуатаційного впливу слід віднести і зміну стану футерівки, оскільки від цього також залежать умови подрібнювання руди. Характер впливу футерівки на процес подрібнювання достатньо складний. На практиці доведено, що продуктивність млинів з гладкою футерівкою менша, ніж продуктивність млинів з ребристою футерівкою [1]. Отож, доцільно використовувати ребристу футерівку. Однак, в процесі роботи в наслідок зносу ребристість буде поступово зменшуватись і в кінці, перед заміною, будемо отримувати гладку футерівку. В процесі експлуатації футерівки буде весь час поступово зменшуватись продуктивність млина, характер такої зміни виявляється складним, а вимірювання стану футерівки – недоступним. Збурюючу

величину $F_{СФ}$, що відповідає певному стану футерівки практично не можливо виміряти і складно враховувати. З врахуванням відміченого, схематичне зображення кульового млина як керованого об'єкта значно ускладнюється (рис. 1, в).

Схематичне зображення кульового млина як керованого об'єкта можна значно спростити, прибравши компенсовані величини, константи і змінні константи. З врахуванням цього отримаємо схему, подану на рис. 2, а, в якій показана лише головна вихідна величина $X_{вих.п}$ – продуктивність по готовому продукту. При керуванні кульовим млином необхідно максимізувати $X_{вих.п}$ в заданих умовах роботи. Цього можна досягти лише змінюючи $\Theta_Ж$ та $\Theta_В$ – живлення млина рудою та витрати води в млин. Збурюючі величини, вказані на схемі, а їх п'ять, будуть заважати даному процесу. Крім того, необхідно враховувати значення вхідних величин – $X_{вх.К}$ і $X_{вх.П}$, тобто, крупність вихідної руди на вході в млин і її подрібнюваність. При такій подачі схеми кульового млина вхідні величини слід компенсувати, знаючи закономірність їх впливу на процес.

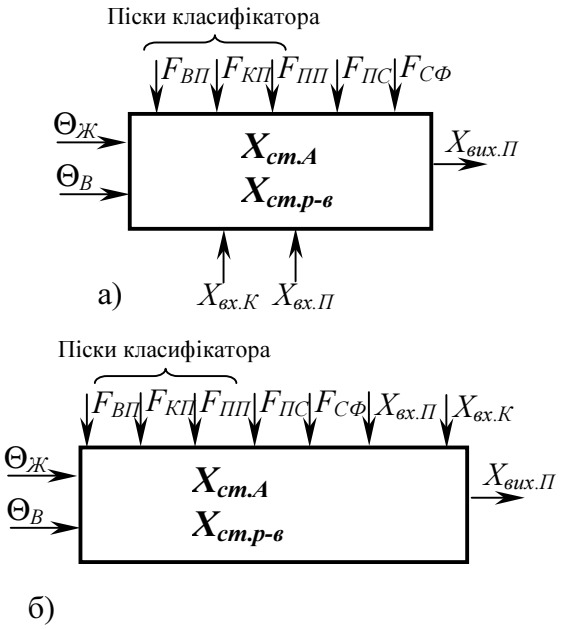


Рисунок 2 – Схематичне зображення кульового млина як керованого об'єкта при різних принципах керування: а – з компенсацією вхідних величин; б – без компенсації вхідних величин

Керувати кульовим млином можливо і з іншим підходом, коли вхідні величини не компенсують. Тоді вони перетворюються у збурюючі діяння і схематичне зображення кульового млина як керованого об'єкта прийме вигляд відповідно рис. 2, б. У даному випадку немає необхідності знати і враховувати закономірності впливу вхідних величин на процес, однак керування ускладнюється збільшенням кількості збурюючих впливів. Їх стає сім і всі вони суттєво впливають на процес подрібнювання матеріалу в кульовому млині.

Наведені схеми (рис. 2) дозволяють аналізувати процес подрібнювання руди в кульовому млині. Залежність між продуктивністю по вихідній руді $\Theta_Ж$ на вході млина і величиною внутрішньомлинового заповнення $X_{ст.А}$ є лінійною, причому нахил ліній даної статичної характеристики залежить від властивостей подрібнюваного матеріалу $X_{вх.П}$, витрат води $\Theta_В$ і циркулюючого навантаження $F_{ВП}$. Залежність між внутрішньомлиновим заповненням $X_{ст.А}$ і продуктивністю по готовому продукту $X_{вих.П}$ в розвантаженні млина є суттєво нелінійною. Причому деякій області оптимальних значень внутрішньомлинового заповнення $X_{ст.А}$ відповідає максимум продуктивності по готовому продукту. Ширина цієї області залежить від таких факторів, як величина і стан внутрішньомлинового кульового навантаження $F_{ПС}$, властивостей вихідного матеріалу $X_{вх.П}$, витрат води у млин $\Theta_В$, стану футерівки $F_{СФ}$ та ін. Наявність екстремуму даної характеристики пояснюється тим, що при збільшенні внутрішньомлинового заповнення $X_{ст.А}$, зростає і продуктивність по готовому продукту $X_{вих.П}$, однак її приріст з ростом внутрішньомлинового заповнення зменшується. Це відбувається за рахунок того, що зі збільшенням внутрішньомлинового заповнення $X_{ст.А}$ зростає гідростатичний тиск в млині, який призводить до більш інтенсивного розвантаження матеріалу, а відповідно, до зменшення часу його перебування у

барабані. В області оптимальних значень внутрішньомлинового заповнення $X_{ст.А}$ додатній приріст продуктивності по готовому продукту $X_{вих.П}$ закінчується, а при подальшому збільшенні внутрішньомлинового заповнення $X_{ст.А}$ інтенсивність виходу матеріалу в розвантаженні млина стає такою, що приріст продуктивності по готовому продукту $X_{вих.П}$ стає від'ємним. При цьому погіршуються умови подрібнювання, а подрібнювальний агрегат працює нестійко. Для здійснення процесу подрібнювання руди в кульовому млині, крім того, необхідно забезпечувати неперервне переміщення матеріалу від вхідної до розвантажувальної горловини кульового млина. Цю функцію в кульових млинах забезпечує вода. Якщо зменшити подачу води, пульпа в млині стає більш густішою, транспортування подрібненого матеріалу уповільнюється, збільшується час перебування подрібненого матеріалу в барабані, подрібнюючі тіла, рухаючись у щільному середовищі, зменшують силу удару, але весь час знаходяться в контакті з частинками руди, руйнуючи їх тиском і перетиранням. Все це приводить до непотрібного переподрібнення матеріалу. При зменшенні густини пульпи в млині створюються умови, які не сприяють нормальному процесу розкриття зерен мінералу, адже збільшується швидкість проходження подрібненого продукту, зменшується час перебування його в барабані, частинки твердого легко видаляються з зони зіткнення куль у міжкульові проміжки і не руйнуються. Отже, при деяких умовах процес подрібнювання найбільш ефективно може відбуватись лише при певному значенні співвідношення руда/вода в кульовому млині. Як встановлено [3], похибка підтримання даного співвідношення не повинна перевищувати ± 3,0 %.

Таким чином, безпідставне збільшення завантаження кульового млина рудою, як і його недовантаження зменшують вихід готового продукту $X_{вих.П}$. Це ж саме можна стверджувати і відносно співвідношення руда/вода в млині. Найбільший вихід готового продукту $X_{вих.П}$ можна отримати лише при певних значеннях внутрішньомлинового заповнення $X_{ст.А}$ і співвідношення руда/вода в млині $X_{ст.р-в}$, які змінюють свої величини в залежності від умов роботи. Їх значення необхідно визначати в кожному конкретному випадку.

На подрібнювання руди в млинах витрачається значна кількість електричної енергії, куль та футерівки. Потужність приводу млина в основному залежить від маси куль [3]. Тому недовантажений і перевантажений рудою млин, не виробляючи необхідної кількості готового продукту $X_{вих.П}$, практично споживає його нормативну потужність від мережі, приводячи в рух близько 120 тон куль. В недовантаженому і перевантаженому млині, не отримуючи належну кількість готового продукту, однаково зношуються кулі та футерівка. Це точно так же відноситься до другого параметру стану млина – співвідношення "руда/вода". Отож, зважаючи на великі обсяги переробки руди, при непідтриманні необхідних значень завантаження млина рудою та розрідження пульпи в ньому не лише значно зменшується продуктивність процесу, але додатково значно перевитрачається електрична енергія, кулі та футерівка.

Раніше робота кульового млина розглянута без впливу збурюючих величин, хоч була відмічена роль внутрішньомлинового кульового навантаження $F_{ПС}$ та стану футерівки $F_{СФ}$. Оскільки тривалий час не привів до позитивного результату в розробці засобів контролю крупності вихідної руди $X_{вх.К}$ та її подрібнюваності $X_{вх.П}$, основною схемою при керуванні кульовим млином слід рахувати зображену на рис. 2, б, де вхідні величини виступають як збурюючі.

Проаналізуємо вплив не розглянутих раніше збурюючих величин. Руди конкретного родовища відрізняються між собою властивостями. Найчастіше окреме родовище представляється кількома типами руд, наприклад, чотирма. Серед інших їх характеристик виокремлюють подрібнюваність – здатність руйнуватись у млинах. В такому випадку родовище буде мати чотири типи руд з різними можливостями

подрібнюватись. Вони, звичайно, мають не однакову степінь вкрапленості корисних мінералів. Покращення подрібнюваності при незмінних інших параметрах збільшить продуктивність млина, причому при сталості вихідного живлення і при налаштуванні агрегату на руду з гіршою подрібнюваністю така зміна призведе до того, що вже подрібнений матеріал буде перетримуватись у млині, а отже переподрібнюватись, спостерігатимуться зайві витрати електроенергії, також зменшиться крупність матеріалу на зливі. Зменшення ж подрібнюваності при незмінності інших параметрів призведе до зниження продуктивності агрегату, до накопичення матеріалу в млині.

Значні коливання крупності вихідної сировини зв'язані з станом дробильного обладнання та явищем сегрегації матеріалу в нижній частині бункера. При заповненні бункера сировиною в сусідні відсіки потрапляють куски, створюючи шар крупного матеріалу, в той час коли в заповненому відсіку накопичуються порівняно дрібні частинки. Збільшення крупності вихідного матеріалу відносно величини, на яку налаштований агрегат, призведе до зменшення його продуктивності по певній величині розміру подрібнюваного матеріалу при незмінності інших параметрів, адже в даному випадку необхідно затратити більше енергії, ніж при подрібнюванні руди, поданої дрібними фракціями. При цьому також спостерігається накопичення матеріалу в млині. Зменшення розміру вихідної руди призведе до підвищення продуктивності агрегату по подрібнюваному матеріалу певної крупності за рахунок того, що в даному випадку на руйнування частинок витрачається менше енергії.

Збільшення циркулюючого навантаження (пісків класифікатора) $F_{ВП}$ при незмінних витратах вихідної руди і води у млин викликає зростання густини пульпи. Зменшення циркулюючого навантаження при незмінних витратах руди і води у млин, навпаки, приводить до розрідження пульпи. Крім того, зміна циркулюючого навантаження впливає на величину внутрішньомлинового заповнення. Тобто, зміна циркулюючого навантаження одночасно впливає на обидва важливі параметри стану кульового млина – заповнення $X_{ст.А}$ та відношення "руда/вода" $X_{ст.р\text{-}в}$. Головними факторами, що визначають циркулююче навантаження, є продуктивність руди та вміст твердого в зливнику класифікатора. Залежність між кількістю пісків та твердого в зливнику класифікатора виражена достатньо різко. Зміна твердого в зливнику класифікатора на певну величину викликає на порядок більше його прирощення в пісках при запізнюванні 60...120 с. При збільшенні циркулюючого навантаження продуктивність кульового млина спочатку зростає, потім спостерігається область максимальної продуктивності, подальше наростання кількості пісків приводе до зниження продуктивності млина. Отож, підтримуючи оптимальну величину циркулюючого навантаження, можна забезпечувати оптимальну продуктивність циклу подрібнювання. Оптимальна величина циркулюючого навантаження буде залежати від крупності, подрібнюваності вихідної руди, необхідної степені розкриття мінеральних зерен (крупність зливу), а забезпечуватись в кожному випадку величиною живлення на вході млина та витратами води.

Кінцевою метою в даному технологічному процесі є розкриття зерен корисного мінералу, тобто отримання на зливі класифікатора певної кількості готового продукту необхідної крупності з встановленим об'ємом відокремлених частинок, наприклад, магнітного заліза. При ручному регулюванні циклу подрібнювання оператор оцінює режим роботи агрегатів на підставі власного досвіду та результатів визначення ряду технологічних величин. До уваги, звичайно, приймають крупність твердого на зливі класифікатора, кількість готового продукту в розвантаженні кульового млина, величину циркулюючого навантаження, крупність та подрібнюваність вихідної руди, заповнення агрегату матеріалом, співвідношення руда/вода в барабані. Враховуються стан футерівки та кульового навантаження. Візуальна оцінка величини цих параметрів

не дозволяє досягти необхідної точності керування внаслідок великих розходжень між їх визначеним і фактичним значенням. Автоматичний контроль необхідних технологічних величин покращує результати, однак слуховий апарат людини не дозволяє підтримувати сталий рівень акустичного сигналу на заданому значенні, яке також оператору визначити достатньо складно. Крім того, результати роботи оператора в даному процесі залежать не лише від його індивідуальних якостей, але і від адаптації до умов шуму та виробничого досвіду. Автоматичний контроль шуму кульового млина покращує показники, оскільки чутливість датчика виявляється набагато вищою можливостей людини. За таких умов при ручному керуванні вдається значно підвищити точність, але вузьким місцем в даному процесі знову залишається оператор. Ефективність його роботи впродовж тривалого часу може змінюватись в широких межах через втомленість та зниження рівня активності фізіологічних систем організму. Відносно сталий рівень помилки може підтримуватись впродовж проміжку часу 2...3 години, а у випадку відстеження двох збурень рівень помилки зростає в 2...3 рази в порівнянні з відстеженням одного збурення [8]. В даному процесі необхідно відстежувати сім основних збурень. Ускладнення полягають і в тому, що вони мають стохастичний характер, а регульовані об’єкти відрізняються значним запізнюванням. Спостерігається також періодичність коливань рівня помилок оператора, які пов’язані зі змінами функціонального стану мозку людини [8]. За таких умов оператор не в змозі досягти високих показників керування процесами в кульовому млині.

Автоматизацією процесу подрібнювання руд тривалий час займався ряд потужних організацій, окремих розробників, вчених. Накопичений достатньо великий досвід в цьому секторі науки і практики, однак до цього часу не вдалося створити повністю автоматизованих систем керування даними процесами. Проведений аналіз вказує на основні причини такого стану. По-перше, процес достатньо складний і однозначно не описується математично. По-друге, на кульовий млин впливає велика кількість параметрів, від яких він змінює свій стан в широких межах, навіть до втрати працездатності. По-третє, інформація про даний процес залежить від великої кількості факторів, відрізняється неоднозначністю, безпосередньо по ній, не враховуючи конкретні ситуації, не можливо впливати на процес. Наприклад, на інтенсивність шуму кульового млина сильно впливає ряд факторів, які не піддаються точному обліку. В наслідок зносу куль шум поступово втрачається, а при добавленні свіжих подрібнюючих тіл спостерігається деяке зростання акустичного ефекту. Після ремонту шум кульового млина стрімко зростає. Все це є недоліком інформаційної системи і викликає необхідність в процесі експлуатації змінювати завдання регулятору, тобто підбирати нові значення оптимального шуму. Закономірності цих змін також неоднозначні. Сказане в певній мірі стосується і інших каналів автоматичного управління. Із аналізу витікає, що автоматичний режим управління даним об’єктом можна здійснити лише при використанні штучного інтелекту, але він поки що відсутній.

Отож, приходимо до висновку, що керування даним об’єктом нині можна здійснити лише за участі людини. Тобто, необхідно створити людино-машинну систему керування, в якій виникає можливість об’єднання в одне ціле людини з її навичками, вмінням відчувати процес на інтуїтивному рівні, передбачати можливі зміни в його ході при зміні певних параметрів, і автомату з його високими показниками надійності, точності та безвідмовності. Тут важливою є організація взаємодії людини і машини для забезпечення максимальної економічної ефективності управління об’єктом. Вирішення питання оптимального розподілу функцій між людиною та машиною і організації їх взаємодії повинно спиратись на принцип: людині – людське, машині – машинне. При цьому необхідно дотримуватись одного з основних напрямів розвитку ергономіки

людино-машинних систем – пристосування машини до людини [9]. Цим положенням відповідає структурна схема, зображена на рис. 3. Вона об'єднує оператора та чотири автоматичні системи: САР кульового навантаження; САР завантаження кульового млина рудою; САР крупності твердого на зливі класифікатора; САР співвідношення руда/вода в кульовому млині. Системами автоматичного регулювання забезпечують високу надійність і точність підтримання параметрів. Оператор за їх допомогою може порівняно легко досягати оптимального режиму роботи кульового млина, враховуючи його стан та інші фактори.

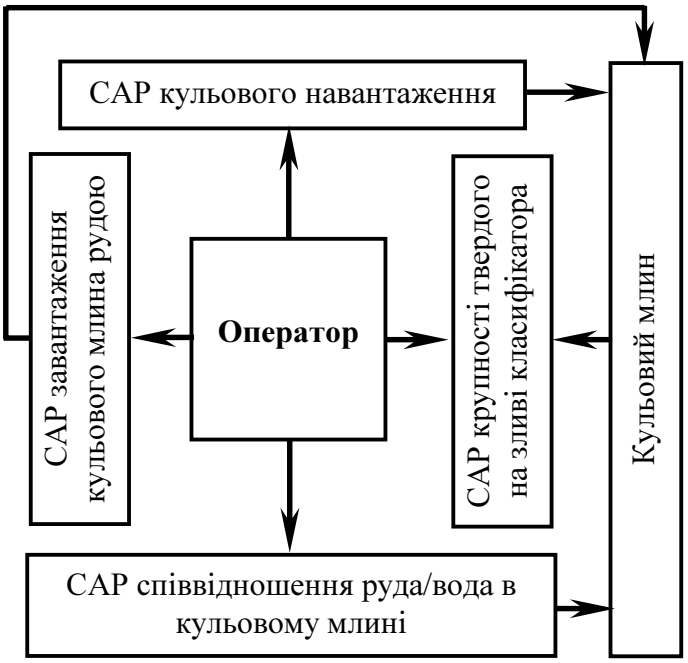


Рисунок 3 – Схематичне зображення структури людино-машинної системи управління роботою кульового млина

Перераховані системи автоматичного регулювання технологічних параметрів вже розроблені і неодноразово реалізовані в різних варіантах. Автоматичний регулятор співвідношення руда/вода, який широко застосовують у розімкнутих циклах, при роботі кульового млина в замкнутому циклі застосовувати недопустимо, оскільки часто коливання пісковового навантаження в кілька разів перевищують зміни вихідного живлення [10]. В наслідок відсутності таку систему слід розробити. Вона повинна реалізувати задачі стабілізації співвідношення руда/вода на різних рівнях. В людино-машинній системі безпосередньо на САР необхідно покласти функцію підтримання параметру з похибкою, що не перевищує ± 3,0 % [3], а на оператора – функцію визначення конкретного рівня співвідношення руда/вода в певних технологічних умовах. Тоді оптимальна структура системи стабілізації розрідження пульпи в кульовому млині буде утримувати оператора, переналагоджуваний оператором задавач співвідношення та САР співвідношення.

В процесі роботи при зміні збурюючого фактора оператор встановлює необхідне (на його думку) співвідношення руда/вода в млині. Після закінчення перехідного процесу з врахуванням запізнювання оператор може оцінити результат введеної ним зміни. При погіршенні показників якості процесу він може під корегувати значення співвідношення для забезпечення наближення ходу процесу подрібнювання до оптимального. Це можливо завдяки тому, що система автоматичної стабілізації заданого оператором співвідношення руда/вода забезпечить його точне підтримання на вказаному рівні зміною витрат води у млин. Достатньо кваліфікований оператор без особливих зусиль і втрат часу може вивести подрібнювальний агрегат на оптимальний режим і підтримувати його, вводячи управляючі діяння при зміні умов роботи за межі встановленої області.

Оскільки процедуру встановлення меж відхилення параметрів також можливо автоматизувати, оператор на керування процесом втрачає занадто мало часу, тому йому немає необхідності знаходитись безпосередньо біля об'єкта. З іншого боку, він може одночасно керувати значною кількістю об'єктів, враховуючи ідентичність їх процесів,

параметрів та сировини, що переробляється. Такий підхід створює можливість значного підвищення кваліфікації оператора. Реалізація такого управління передбачає, крім того, комп'ютерну інтеграцію технологічного обладнання та пристроїв керування.

Таким чином, структура управління кульовим млином, що працює в замкнутому циклі, вміщує оператора та чотири локальні автоматичні системи, три з яких на сьогодні розроблені. Необхідно розробити систему автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в млині, в структуру якої входить оператор, задавач співвідношення та безпосередньо САР даного параметру, яка повинна підтримувати його з похибкою, не більше ± 3,0 %. Оптимальна структура управління, крім того, передбачає автоматичне визначення виходу параметрів за межі зони допустимого відхилення та комп'ютерну інтеграцію технологічного і управлінського обладнання з можливістю керування одним оператором.

Наукова новизна полягає в тому, що вперше визначена оптимальна структура управління кульовим млином, яка повинна включати оператора та технічні засоби, а також структура нерозробленої на сьогодні системи стабілізації розрідження пульпи, що вміщує оператора, задавач співвідношення та безпосередньо САР співвідношення.

Теоретичне значення дослідження зводиться до визначеності шляхів розв'язання даної задачі щодо структури управління як окремим млином, так і їх комплексом, а також структури нерозробленої на сьогодні системи стабілізації розрідження пульпи в агрегаті. Практична цінність – це в основному зменшення витрат електроенергетичних та матеріальних ресурсів в процесі подрібнювання руд при одночасному підвищенні технологічних показників.

Подальші наукові розробки в даному напрямку зводяться до створення невідомої на сьогодні системи стабілізації розрідження пульпи в кульовому млині, що працює в замкнутому циклі з спіральним механічним класифікатором; обґрунтування алгоритмів дій оператора у змінних умовах функціонування; накопичення фактичних даних про керування даним процесом, створення штучного інтелекту та здійснення повного автоматичного керування подрібнюванням вихідної сировини.

Список літератури

1. Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Недра, 1966. – 396 с.
2. Автоматизация технологических процессов на горнорудных предприятиях: Справочное пособие /Под ред. В.С. Виноградова. – М.: Недра, 1984. – 167 с.
3. Гончаров Ю.Г., Давидкович А.С., Гейзенблазен Б.Е, Гуленко Г.В. Автоматический контроль и регулирование технологических процессов на железорудных обогатительных фабриках. – М.: Недра, 1968. – 227 с.
4. Марюта А.Н., Бунько В.А. Экспериментальное определение статических характеристик объектов управления обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1969. – 120 с.
5. Тихонов О.Н. Решение задач по автоматизации процессов обогащения и металлургии. – Л.: Недра. Ленинградское отделение, 1969. – 430 с.
6. Марюта А.Н., Давидкович А.С., Гуленко Т.И., Кондратец В.А. Автоматизация процессов обогащения руд. – К.: Техника, 1972. – 140 с.
7. Козин В.З., Тихонов О.Н. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов. – М.: Недра, 1990. – 343 с.
8. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. – М.: Советское радио, 1968. – 256 с.
9. Тимофеев А.В. Роботы и искусственный интеллект. – М.: Наука, 1978. – 192 с.
10. Комарский Б.Д., Ситковский А.Я., Красномовец А.В., Рабинович Г.А. и др. Автоматизация управления обогатительными фабриками. – М.: Недра, 1977. – 525 с.

УДК 629.7.07

С.І. Осадчий, О.В. Куценко, доценти, канд. техн. наук, І.А. Шаповалова, асп.
Кіровоградський національний технічний університет

Обгрунтування методики розробки системи автоматичної імітації динаміки складного комплексу

У статті показано доцільність створення системи управління станом комплексу створення штучної пожежі технічного об'єкту.
пожежно – рятувальний полігон, аналітичне конструювання, оптимальне оцінювання, імітаційне моделювання, ідентифікація

В теперішній час забезпечення безпеки польотів на Україні, особливо в галузі пошуку та спасіння є дуже важливим завданням. За багатьма критеріями Україна не відповідає вимогам ІКАО. Насамперед, це стосується рівня професійної підготовки рятувальних служб аеропортів. Створення рятувальних команд на позаштатній основі виключає можливість централізованого керування якістю їхньої професійної підготовки. Через економічний стан аеропорти та авіакомпанії не здатні забезпечити персонал аварійно – рятувальних команд належним обладнанням та спорядженням, і не можуть створити відповідні тренувальні полігони.

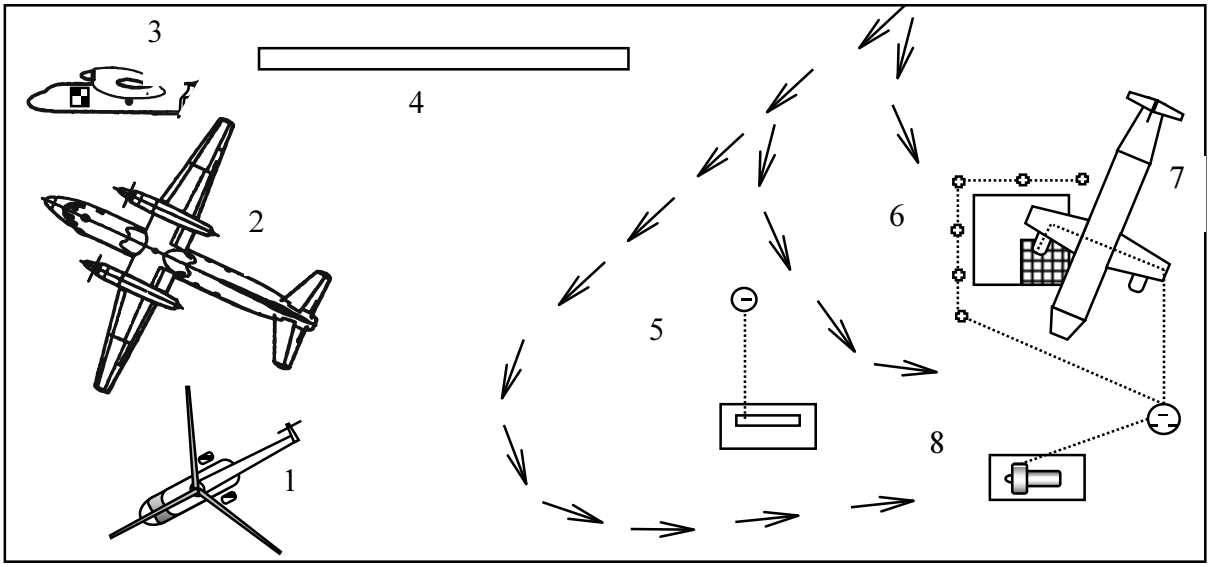
Враховуючи важливість тренажерної підготовки в формуванні професійно – важливих якостей, її внесок в забезпечення безпеки польотів необхідно до даної проблеми підходити комплексно та системно. Тренажер представляє собою технічно складний комплекс, який дозволяє отримати навички та вміння потрібні в реальних умовах роботи. Найбільш прийнятним є ситуаційний підхід. Даний підхід дозволяє моделювати зону і ситуацію в відповідності з реальною практикою. Застосування нової тренажерної техніки на базі мікропроцесорних пристроїв дозволяє якісно моделювати ситуації, які виникають під час аварій та авіакатастроф. Безперечною перевагою тренажерів по відношенню до інших видів техніки є малі часові затрати на навчання персоналу, можливість всебічного контролю за процесом навчання , широкі варіації умов та ситуацій під час виконання тренувань, незалежність від зовнішніх факторів, безпечність.

Тому в учбовому центрі пошуку та спасіння на базі Державної Льотної Академії України проводяться роботи по створенню комплексу тренажерних пристроїв та напівнатурних макетів авіаційних двигунів та літаків. На базі ДЛАУ планується створення пожежно – рятувального полігону для проведення спеціальних видів робіт на місці авіаційних катастроф курсантами і працівниками пожежно – рятувальних загонів аеропортів. Необхідно відмітити той факт, що жоден з аеропортів України не володіє вказаним полігоном і тренажерами.

Новизна та конкурентноздатність визначається відсутністю аналогів таких полігонів на території України та країн СНД.

На основі вимог РПАСОП і міжнародного досвіду пропонується застосування комбінованої схеми полігону, яку зображено на рисунку 1:

© С.І. Осадчий, О.В. Куценко, І.А. Шаповалова. 2004

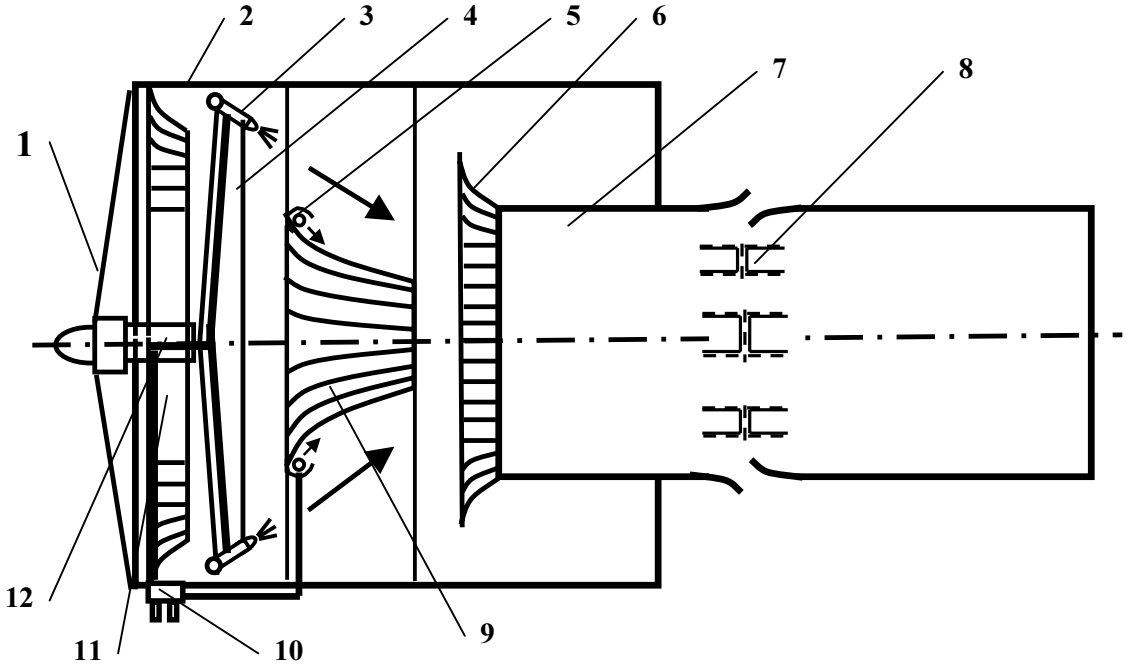


1 – рятувальний гелікоптер; 2 – тренажер "Аварійний літак"; 3 – зона розрізання фюзеляжу; 4 – смуга перешкод; 5 – тренажер "Екран"; 6 – зона розлитого палива; 7 – тренажер "Пожежний макет літака"; 8 – тренажер "Пожежний макет двигуна та шасі".

Рисунок 1 - Схема полигону на аеродромі Кіровоград

Структуру полігону узгоджено з керівництвом служби пожежної безпеки Укравіатранса, Кіровоградською обласною лабораторією державного пожежного нагляду.

На даний момент виконано експериментальну розробку пожежного макету двигуна та шасі. Макет двигуна представлено на рисунку 2.



1- захисна сітка; 2- зовнішній силовий контур; 3- реактивна робоча горілка ; 4- вентиляторний пристрій; 5- пускова горілка з захисним кожухом; 6- середній дефлектор; 7- внутрішній силовий контур; 8- перепускні канали; 9- внутрішній дефлектор; 10- внутрішній відсічний клапан; 11- зовнішній дефлектор з вузлом підвіски вентилятора; 12- система подачі газу до горілок, що обертаються.

Рисунок 2 - Макет двигуна

Пожежа в середині двигуна імітується трубкою, що обертається з форсунками. Обертання відбувається за рахунок реактивної тяги від полум'я форсунки.

Запропонований макет володіє рядом недоліків, серед яких можна виділити наступні : ручна система керування подачею газу, підпал факелу відбувається вручну, відсутність контролю за наявністю полум'я в камері, не передбачено заходів щодо виключення зворотного удару, не передбачено аварійної зупинки, недостатня якість процесу імітації пожежі.

Зважаючи на вище вказані недоліки, було прийнято рішення про розробку системи керування процесом штучного створення пожежі з метою їх усунення або зменшення їхнього впливу на якість процесу імітації.

Найвищої якості системи, що проектується можна досягти при виконанні аналітичного проектування, тобто при попередньому проектуванні системи. Суть полягає в тому, щоб в результаті розв'язання задачі аналітичного конструювання оцінити граничні можливості системи, що проектується і їх відповідність вимогам. При виконанні аналітичного конструювання планується отримати оптимальну структуру та параметри системи.

Базу для створення оптимальної системи становлять алгоритми оптимального синтезу. Для успішного вирішення поставленої задачі необхідно мати інформацію про реальні характеристики заданої частини системи, сигналів, збурень і завад, які діють в системі. Дану інформацію планується отримати в результаті виконання ідентифікації та експериментальних досліджень . Експериментальні дослідження будуть виконані в умовах, близьких до реальних. Наявність такої інформації дасть змогу синтезувати такий регулятор, застосування якого дозволить значною мірою зменшити вплив завад, які діють в системі. Проведення етапу ідентифікації передбачає наявність відповідних алгоритмів ідентифікації. Цей етап дає необхідну інформацію для проведення аналітичного проектування нової і оптимальної корекції існуючих систем.

В результаті аналітичного проектування системи, призначеної для роботи в конкретних умовах експлуатації, буде визначено оптимальну якість системи, що розробляється і виконано порівняння її порівняння з заданим.

Для проведення необхідних дослідів використовується макет частини літака, в якому імітується пожежа. Необхідно відмітити, що створення і розвиток методів діагностики процесів горіння є однією з актуальних задач наукових досліджень. За допомогою відповідних генераторів шумів та спеціальної системи керування створюється така динамічна обстановка, що імітує динаміку досліджуваного об'єкту в реальних умовах. Визначаються основні характеристики факелу полум'я. Для визначення таких характеристик полум'я як його колір та висота використовуються оптичні методи дослідження, так як вони є найбільш придатними для вивчення швидкоплинних процесів горіння.

Після цього використовуючи методи оптимального оцінювання та структурної ідентифікації визначаються моделі динаміки вхідного та вихідного векторів досліджуваного об'єкту. В даний час все більшого поширення набувають спектральні структурні методи ідентифікації [1]. В даній роботі передбачається розв'язання задачі ідентифікації складного технічного об'єкту та неконтрольованих впливів при неповній вихідній інформації. Задача отримання найкращих оцінок динамічних характеристик об'єкту і вектору впливів за даними вимірювання вхідного та вихідного векторів розглядається з позицій теорії оптимальної фільтрації. Розв'язання задачі вимірювання та ідентифікації динамічних властивостей лінійного стаціонарного динамічного об'єкту можна використати для виконання перших попередніх оцінок шуканих динамічних властивостей.

Таким чином, в процесі розробки системи керування станом комплексу штучного створення пожежі планується виконати наступне :

- визначити реальні умови роботи системи, що проектується;
- створити комплекс технічних засобів для проведення експериментальних досліджень для визначення характеристик заданої частини системи, сигналів, збурень і завад, які діють в системі;
- виконати обробку результатів досліджень в реальних умовах роботи системи та провести оптимальне оцінювання та структурну ідентифікацію для визначення динамічних характеристик об'єкту керування,
- отримання математичні моделі та визначити близькість характеристик моделі до динамічних характеристик реального об'єкту ;
- на основі результатів експериментальних досліджень виконати синтез оптимального регулятору;
- оцінити якості запропонованої системи;

Впровадження даної системи керування дозволить значно підвищити якість процесу підготовки персоналу аварійно – рятувальних загонів, відпрацювання навичок роботи в екстремальних ситуаціях та умовах.

Список літератури

1. Блохин Л.Н. Оптимальные системы стабилизации. – К.:Техника, 1982. – 140 с.
2. Куценко А.В. Проблемы подготовки членов аварийно – спасательных команд в соответствии с требованиями ИКАО. // Современные информационные технологи в управлении и профессиональной подготовке операторов сложных систем. Международная научно – практическая конференция. Тезисы докладов. – Кировоград: Изд-во ГЛАУ, 2003 г.

УДК 621.9.048.4

Ю.О. Єрмолаєв, доц., канд. техн. наук, Г.В. Савеленко, асистент
Кіровоградський національний технічний університет

Розробка САУ електромеханічного приводу станка типу “Дуга” на базі “ЭШИМ–1”

В статті приведена розробка електропривода електроерозійного станка “Дуга” на базі багатокоординатного комплектного привода ЭШИМ-1, який дозволить спростити електроавтоматику станка з збереженням аналогічних параметрів обробки, що досягаються при роботі на гідроприводі.
напруга електричної дуги, електрод-інстумент, електропривод постійного струму

Науково-технічний прогрес ставить нові вимоги до технологічного обладнання, що викликано зміною виробничих задач внаслідок підвищення вимог до якості обробки, продуктивності, складності геометрії, а також зміною елементної бази та засобів виробництва (приводи, електронні системи управління і т.п.)

Електроерозійні станки типу “ДУГА” мають високу продуктивність при обробці деталей з надтвердих металів [3]. На діючих станках подача електрода здійснюється гідравлічним приводом, який задовольняє потребу в статичних і динамічних режимах, але має ряд суттєвих недоліків: такі як забруднення, наявність додаткового нагнітача масла, шум, громіздкість конструкції тощо.

Для якісного удосконалення даного процесу шляхом оптимізації та інтенсифікації необхідні комплексні дослідження, які можуть бути виконані тільки при наявності надійної теоретичної бази [4]. Тому дослідження, які направлені на впровадження сучасних електромеханічних приводів і автоматичних систем керування верстатами РОД є актуальними.

Розвиток електроприводів для електроерозійних верстатів реалізуються за такими напрямками:

- приводи на базі лінійних двигунів;
- приводи на базі крокових двигунів;
- приводи на базі двигунів постійного струму.

У лінійних сервоприводах відсутнє: перетворення обертального руху в лінійний, ШВП (кульковогвинтова пара), зубчатих або пасової передач – двигун переміщує передусім сам себе. Хоча точність подачі складає мікрони та долі мікрона, але вагомим недоліком даної системи є висока вартість сервоприводу, особливо приводи, що пропонуються зарубіжними виробниками.

На даний час перспективним є електроприводи на базі крокового двигуна. Для дослідження процесів електроерозійної обробки РОД було використано швидкодіючий чотирьохфазний реактивний кроковий двигун [1]. Застосування крокового двигуна для привода головок РОД є доцільним, так як забезпечує точне позиціювання електрод-інстумента ЕІ, за допомогою імпульсних керуючих команд [2]. Система забезпечує стартостопний режим руху електрода при надходженні команд з вузла завдання. Система керування кроковим приводом забезпечує програмне керування (режим роботи від ПЕОМ) та ручне (режим роботи в режимі наладки)[1]. Недоліком електроприводу є часті зриви електричної дуги за рахунок проковзування ротора.

Для дослідження процесів електроерозійної обробки РОД виготовлено діючий макет станка з електричним приводом на базі комплектного багатокоординатного

© Ю.О. Єрмолаєв, Г.В. Савеленко. 2004

транзисторного електроприводу постійного струму типу “ЭШИМ – 1”, що випускається НВО “Етал” м. Олександрія [5].

Механічна частина станка виконана на базі свердлильного верстату. На валу верстата співвісно закріплений високомоментний двигун ДП–60–90–4–24–Р11 за допомогою блока спряження та планетарного редуктора з двома внутрішніми зачепленнями. Планетарний редуктор з передаточним відношенням і=190,67 жорстко приєднаний до вала двигуна і через блок спряження жорстко приєднаний до вала свердлильного станка. Також через блок спряження виконане кріплення редуктора та високомоментного двигуна до станини станка. Структурна схема системи керування автоматичної подачі електрода-інструмента (ЕІ) на базі ЭШИМ – 1 зображена на рис.1.

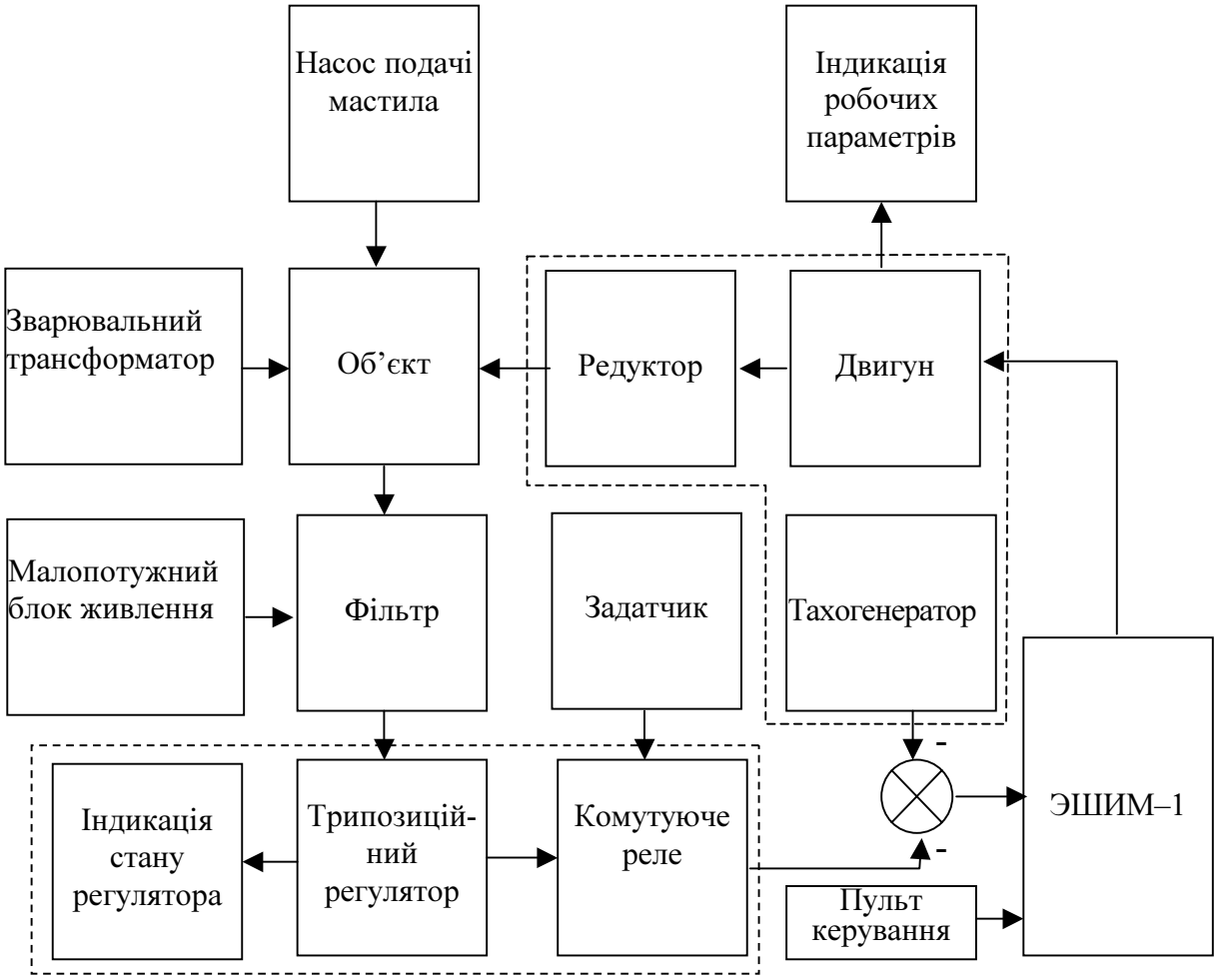


Рисунок 1 - Структурна схема системи керування автоматичної подачі електрода-інструмента (ЕІ) на базі ЭШИМ – 1

Система керування приводом автоматичної подачі ЕІ працює в автоматичному та налагоджувальному (ручний і автоматичний) режимах роботи. САУ автоматичної подачі ЕІ забезпечує як стартостопний режим подачі ЕІ так і режим сервоподачі.

Робота в автоматичному режимі. Напруга дуги, що створюється зварювальним трансформатором, знімається з ЕІ та заготовки і надходить до блока фільтрації, де відфільтровуються зайві гармоніки і наводки та приводиться значення напруги дуги до заданого від 0 до 5.6В за допомогою дільника напруги. Напруга дуги поступає на вхід трипозиційного регулятора, який в залежності від амплітуди напруги перемикає контакти комутуючого реле. Можливі три стани в яких може знаходитись регулятор: амплітуда напруги вище норми, норма, нижче норми.

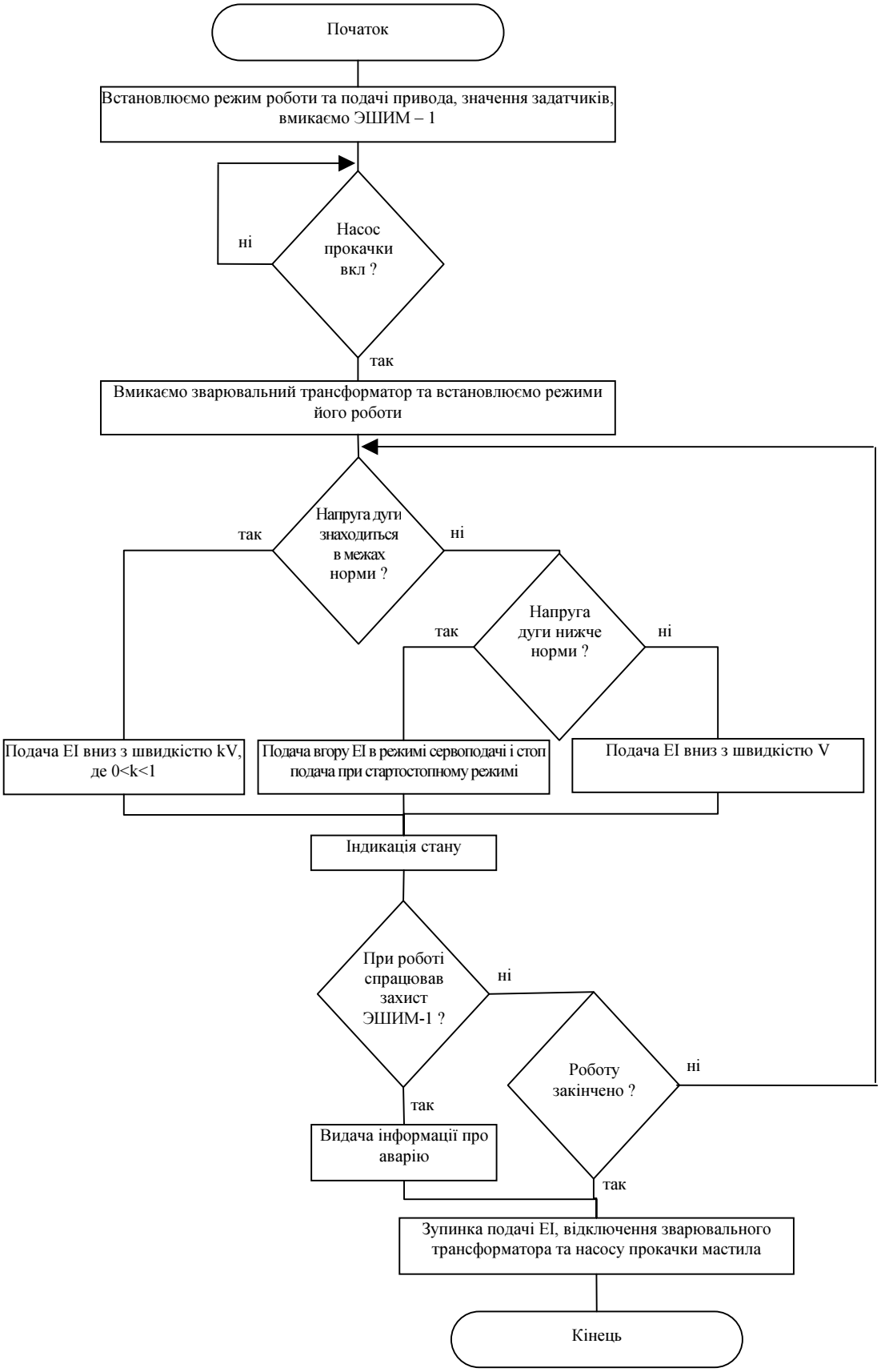


Рисунок 2 - Алгоритм функціонування САУ
електромеханічного приводу станка типу ДУГА

В залежності від перерахованих станів комутуюче реле подає відповідну опорну напругу з задатчика на пристрій порівняння. На пристрої порівняння порівнюються значення напруги що поступають з задатчика та тахогенератора і їх різниця поступає на схему блока регулювання ЭШИМ -1. Блок регулювання керує частотою обертання двигуна в залежності від напруги задатчика.

Робота в налагоджувальному автоматичному режимі. Напруга, що створюється внутрішнім малопотужнім джерелом живлення, знімається з ЕІ та заготовки і надходить до блока фільтрації, а далі схема працює, як і при автоматичному режимі роботи. Відмінність режиму полягає в тому, що в камері не відбувається горіння дуги, а сама камера може бути відкритою, що дає можливість точно спозіціонувати деталь-заготовку відносно ЕІ.

Робота в налагоджувальному ручному режимі. Режим дозволяє виконувати швидкий підвід та відвід електроерозійної головки (ЕГ) в зону та з зони роботи. Режим необхідний при заміні ЕІ та ЕГ.

Алгоритм функціонування САУ електромеханічного приводу станка типу ДУГА наведений на рис.2.

Таким чином створений макет на базі комплектного багатокоординатного транзисторного електроприводу постійного струму типу “ЭШИМ – 1”, який дозволяє реалізувати технологічну операцію знімання металу на станкові типу “Дуга”. Даний привод має значно менші габарити, більшу економічність та надійність по відношенню до аналогічного з гідроприводом.

Список літератури

1. Носуленко В.І., Єрмолаєв Ю.О., Сіса О.Ф., Телюта Р.В. САК кроковим електроприводом для верстату розмірної обробки дугою. Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету / Техніка в сільському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Випуск 11., Кіровоград, 2002, С. 212-215.
2. Сабин Ю.А., Кулешов В.И., Шмырева М.М. Автономные дискретные электроприводы с силовыми шаговыми двигателями. – Л.: Энергия, 1980. – 168 с.
3. Носуленко В.І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореферат дис. на здобуття наукового ступеня док.техн.наук. – Київ: 1999. – 36 с.
4. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов.– 6-е изд., доп. и перераб. М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
5. Експлуатаційна документація ЭШИМ–1-220000107УХЛ4 ИГЕВ654773.002-03.18 №2427.

УДК. 631.2:631.171.65

Л.Г. Віхрова, доц., канд. техн. наук, Т.О. Слюсаренко, асп.
Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград

Дослідження параметрів автоматизованої системи температурно-вологісного поля в приміщенні багатапрольотної теплиці

У статті на основі проведених досліджень в теплиці обрано методику чисельної оцінки статистичної нерівномірності розподілення температури температурно-вологісного поля у теплиці.
датчик, температурно-вологісне поле, математичне очікування, похибка інтерполяційного члена, теплиця

Серед сучасних багатомірних систем сільськогосподарського об'єкту управління з розподіленими параметрами важливе місце займають тепличні приміщення з регулюємим штучним мікрокліматом.

Недотримання мікрокліматичних умов при вирощуванні овочів призводе до зниженню врожаїв. При створенні мікрокліматичних умов в тепличному приміщенні важливу роль відіграє система раціонального контролю його режимних параметрів.

Для ефективного управління параметрів мікроклімату необхідно мати достовірні дані про просторово-часові характеристики параметричних температурно-вологісних полів теплиці та з урахуванням отриманої інформації формують управляючу дію .

Для дослідження основних закономірностей просторового розподілення температурно-вологісного поля теплиці використовували аналітичні та експериментальні шляхи.

Найбільш широкий розвиток отримав метод дослідження параметричних температурно-вологісних полів в тепличному приміщенні [2,3], який базується на обробці експериментальних даних, що безпосередньо збираються в процесі функціонування досліджуємого об'єкту. В наслідок великої кількості збурюючих факторів випадкового характеру, які впливають на формування температурно-вологісних полів багатопрольотної теплиці, для дослідження їх характеристик використовувались варіаційно-статистичні методи.

У даній роботі виділені істотно специфічні умови, які характерні для теплиць, та обґрунтований ефективний метод синтезу розподілення контролю їх режимних температурно-вологісних параметрів. При цьому головна увага приділялась дослідженню характеру розподілення параметричних полів тепличного приміщення, який визначає вибір раціональної структури автоматичної системи контролю [3].

Необхідна відстань між датчиками, які розташовані по об'єму теплиці, оцінювались за методикою [3].Сутність методу полягає в тому, що отримана первинна дискретна інформація від датчиків, які розташовані по всій теплиці, шляхом відповідної інтерполяції відновлюють дійсний рельєф параметрів температурно-вологісних полів, що досліджувалися.

Розподілення температурних полів в багатопрольотній теплиці носить випадковий характер. Тому зміну температури $\Theta[x, y, \tau]$ та відносної вологості $\varphi(x, y, \tau)$ повітря по довжині x та ширині y та за часом τ у приміщенні теплиці розглядали як випадкову функцію. При цьому стаціонарність поля обумовлюється незалежністю статистичних характеристик від координат точки поля, яка розглядалась.

© Л.Г. Віхрова, Т.О. Слюсаренко. 2004

Для цього потрібно визначати для кожної *i*-ої точки просторової координати приміщення математичне очікування $m_t(x_i)$, $m_t(y_i)$ та для кожної пари точок i та j кореляційну функцію поля $r_t(x_i,\ x_j)$, $r_t(y_i,\ y_j)$. Оцінку статистичних характеристик обчислювали за усередненим значенням $\Theta(x, y)$.

Далі для спрощення запису приймемо $\Theta(x_i, \tau_k) = \Theta(x_i)$.

Математичне очікування поля і-ої точці оцінили по виразу [1,4]:

$$m_t(x_i) = \frac{\sum_{k=1}^{S} \Theta(x_i)}{S}; \quad (i = 1,2,..., N), \tag{1}$$

де S - загальне число реалізацій.

Кореляційну функцію для будь яких інших точок температурного поля оцінили за виразом:

$$r_t(x_i,\ x_j) = \frac{\sum_{k=1}^{S} \left[\Theta(x_j) - m_t(x_i)\right] \left[\Theta(x_j) - m_t(x_j)\right]}{S-1} \tag{2}$$

Обчислення оцінки кореляційної функції в різних точках поля $r_t(x_i,\ x_j)$, $r_t(y_i,\ y_j)$ проаналізували з точки зору близькості їх значень при рівних $x = x_i - x_j$ та $y = y_i - y_j$. Можлива нестаціонарність за математичним очікуванням виключалася центруванням функції $\Theta(x, y)$. Значення центрованої функції для любої вимірюванної точки поля в одній з множин отриманих реалізацій визначали по формулі

$$\Theta_K^*(x_i) = \Theta_k(x_i) - m_t(x_i), \tag{3}$$

де $k = 1,2,..., S$.

При цьому істинне значення величин, які контролювалися по просторовим параметрам приміщення теплиці оцінювалось інтерполяцією температурного поля в точках:

$$x_0, x_1, ..., x_{m-1}, x_{m+1}, ...x_m. \tag{4}$$

По умовам поставленої задачи виконувалась наступна нерівність

$$\sqrt{M\left[\varphi(x) - i^*(x)\right]^2} \le \sigma, \tag{5}$$

де M - математичне очікування;

σ - задане значення середньоквадратичної похибки вимірювання досліджуємого розподілення температурного поля.

Використовуючи для цієї мети параболічну інтерполяцію за теоремою Лагранжа [1], отримали розраховане значення температурного поля:

$$\varphi(x) = R_0\Theta^*(x_0) + R_0\Theta^*(x_1) + ... + R_m\Theta^*(x_m) + ... + R_0\Theta^*(x_m). \tag{6}$$

При цьому похибка інтерполяційного члена оцінювалась виразом

$$\varphi(x) - \Theta(x) = \frac{\Theta^{*(K+1)}(\zeta)}{(K+1)^!}(x - x_0)(x - x_1)...(x - x_k), \tag{7}$$

де ζ - деяке проміжне значення між точками x_0 та x_k.

Для оцінювання значень $(x - x_0)...(x - x_k)$ в формулу (7) підставили $x = x_m + h/2$,

де h - шукана відстань між сусідніми вимірювальними точками температурного поля:

$$(x - x_0)...(x - x_k) = h^{K+1}\prod_{p=0}^{K}\left[(m - p) + \frac{1}{2}\right]; \tag{8}$$

$K+1$ - число вузлів інтерполювання.

Максимальне значення множення (8) приймали при $m = K$. Тоді

$$(x-x_0)...(x-x_k) \le \frac{h^{K+1}}{2^{K+1}} 1.3.5...(2K+1). \tag{9}$$

Підставивши в формулу (5) значення похибки багаточлена (6) та враховуючи оцінку (9), отримали:

$$\sigma \ge \frac{\sqrt{M\left[\Theta^{*K+1}(\zeta)^2\right]}}{K+1} \frac{h^{K+1}}{2^{K+1}} 1.3.5(2K+1) \tag{10}$$

Тут $M = \sqrt{\left\{M\left[\Theta^{*(K+1)}(\zeta)\right]\right\}^2} = \left[\Theta^{*(K+1)}(\zeta)\right]$.

З огляду на те, що в даному випадку вимірювальна функція центрована, можна стверджувати, що середнє значення $(K+1)-$*ої* похідної такої функції завжди дорівнює нулю, а сама функція $\Theta^{*(K+1)}(x)$ є також стаціонарною та випадковою.

За визначенням дисперсії центрованої функції та стаціонарної випадкової функції можна записати

$$\left[\Theta^{*(K+1)}(\zeta)\right]_{сер.кв} = \sqrt{r_{t(K+1)}(0)}. \tag{11}$$

Враховуючи формулу (2) для визначення кореляційної функції $(K+1)-$*ої* похідної

$$r_{t(K+1)}(x) = (-1)^{K+1} r_t^{[2(K+1)]}(x) \tag{12}$$

та підставляючи її у вираз (11), отримали

$$\left[r_t^{*(K+1)}(\zeta)\right]_{сер.кв} = \sqrt{(-1)^{K+1} r_t^{2(K+1)}(0)}. \tag{13}$$

Для цілих функцій експоненціального типу, для яких норма

$$\|\lambda\|^2 = \int_0^\infty [\lambda(\tau)]^2 d\tau < \infty \tag{14}$$

де λ - функція експоненціального типу.

Справедлива наступна нерівність:

$$-\infty \overset{\max}{<} x < \infty^{\left[\lambda^K,\tau\right]} \le \sqrt{\frac{\omega_c}{\pi}} - \|\lambda\| \frac{\omega_c}{\sqrt{2K+1}} \tag{15}$$

де ω_c - частота зрізу спектра функції $r_t(x)$.

У нашому випадку кореляційна функція відноситься до вказаного класу, тобто для неї виконується умова

$$\|r_t\|^2 = \int_{-\infty}^\infty [r_t(x)]^2 dx < \infty \tag{16}$$

Тому

$$-\infty \overset{\max}{<} x < \infty \left| r_t^{[2(K+1)]} x \right| = r_t^{[2(K+1)]}(0) \le \sqrt{\frac{\omega_c}{\pi}} \|r_t\| \frac{\omega_c}{4K+1}. \tag{17}$$

Підставляючи оцінку (17) у формулу (13), та відповідно до виразу (10), отримали

$$\sigma \ge \frac{1.3.5...(2K+1)}{(K+1)^! 2^{K+1}} \cdot h^{K+1} \sqrt{\frac{\omega_c^{2(K+1)}}{4K+5}} \sqrt{\frac{\omega_c}{\pi} \|r_t\|} \ . \tag{18}$$

Розв'язуючи цей вираз, визначили шукану відстань між сусідніми датчиками $h_Д$:

$$h_{Д} = \frac{2^{K+1}}{\omega_c} \sqrt{\frac{(K+1)!\sigma}{1.3.5...(2K+1)\sqrt{\|r_t\|\sqrt{\frac{\omega_c}{\pi(4K+5)}}}}} \tag{19}$$

При використанні найбільш простої лінійної інтерполяції $h_{Д}$ відстань між сусідніми датчиками

$$h_{Д} = \frac{2}{\omega_c} \frac{\sqrt{\frac{2}{3}\sigma}}{\sqrt{\|r\|\sqrt{\frac{\omega_c}{\pi}}}} \tag{20}$$

Для отримання числових значень статистичних параметрів, які описують даний процес, було проведено ряд досліджень по визначенню первісної інформації про розподілення температурно-вологісного поля тепличного приміщення. В якості експерементуємого приміщення було використано приміщення теплиць с.Северинка Кіровоградської області та Уманського тепличного комбінату.

Дослідження проводились контрольними датчиками температури та вологості повітря, були розміщені на висоті 0,9 м від пола в 40 місцях приміщення теплиці, було визначено розподілення температурно-вологісних параметрів по всій площині 1 Га теплиці.

Для оцінки статистичного розподілення мікрокліматичних режимних параметрів було проаналізовано значення температури та відносної вологості повітряного середовища в контрольних точках досліджуємого приміщення теплиці. Виявилось, що характер температурно-вологісного поля непостійний для окремих прольотів теплиці та різноманітних моментів часу. Для чисельної оцінки статистичної нерівномірності розподілення температури температурно-вологісного поля у теплиці була застосована методика, яка заснована на вірогідному підході.

З аналізу отриманих даних при дослідженні було визначено, що середньоквадратичні відхилення температури σ_t, які характеризують розкид по площині теплиці – величини непостійні. В літній період при значному вентилюванні тепличного приміщення помітна тенденція до збільшення нерівномірності температурного поля, а в окремі моменти часу коливання температури складає 7,50. Восени та взимку така тенденція зменшується. При нашому дослідженні розкид параметрів відносної вологості повітряного середовища по площині приміщення був незначний та становив для літнього періоду 3…6%, а в перехідний та зимовий період збільшувався до 12%.

Отримані характеристики свідчать про високий рівень динамічних зв'язків між процесами вимірювання температури повітря на низьких частотах. Усереднюючи значення $r_t(x_i,\ x_j)$ при різноманітних x, отримали апроксимовану функцію:

$$r_t = A_1 \exp(-\gamma_1)\|x\|, \tag{21}$$

де $A_1 = 0.418,\ \gamma_1 = 0.90.$

Значення функції $\|r_{ty}\|$ по координаті x склала $\|r_{tx}\| = 1.253$.

Застосовуючи перетворення Фур'є до формули (21), отримали вираз для спектральної щільності поля

$$S_{tx}(\omega) = \frac{A_1}{\pi} \frac{2\gamma_1}{\omega^2 c + \gamma_1^2} \tag{22}$$

Частота зрізу по просторовій координаті x склала $\omega_m = 0{,}418$.

При заданому значенні точності контролю температурного поля, рівного 0,1 отримали оцінку для необхідної відстані між сусідніми датчиками, які розташовані по координатній перемінній x.

При використанні лінійної інтерполяції поля, коли $K = 1, \omega_m = 0.418$ та $\|r_t\| = 1{,}253$ шукана відстань склала 2,6 м.

Таким чином, при розгляданні теплиці, як об'єкта з розосередженими та взаємопов'язаними параметрами, нами був застосований принцип виміру температурного та вологісного поля за допомогою визначеної кількості датчиків, координати яких в нормальній площині не змінні. Отримані дані в середині координатних полів дозволяють внести відповідні зміни в структуру системи регулювання при застосуванні сучасних сенсорних датчиків.

Список літератури

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука, Гл.ред.физ.-мат. лит.,1986. – 544 с.
2. Россин М.Ф. , Булыгин В.С. Статистическая динамика и теория эффективности систем управления – М.: Машиностроение, 1981. – 312 с.
3. Мартыненко И.И., Тимошенко Ю.А. Разработка систем автоматизации микроклимата сельскохозяйственных производственных помещений. УСХА, вып.185. - Киев: 1977. - С. 95-101.
4. Koncyncki B., Nunamaker J.F. Mathematical programming models for physical information systems design. – Purjue university, 1973. – 425 p.

УДК 637.127.6

В.О. Зубенко, В.О. Версаль, доц., канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Ефективність роботи автоматичної системи діагностики захворювання тварин маститом

В статті визначена ефективність роботи переносного варіанту автоматизованої системи діагностики захворювання тварин маститом, реалізованого на основі запропонованого нового алгоритму, за сигналами від первинних перетворювачів температури та електропровідності молока.
структура, датчики температури, індуктивна комірка, електропровідність, алгоритм, молоко, мастит, діагностика

Одним із факторів, які гальмують ріст виробництва молока, є захворювання молочної залози корів – маститом. Захворювання тварин маститом наносять господарствам значних збитків, за рахунок зниження удою, передчасної вибраковки тварин, погіршення якості виготовлених молочних продуктів, а також непридатності для використання молока під час лікування та певний період після його закінчення. Діагностика клінічних маститів з використанням сучасних засобів не представляє значних труднощів для ветеринарних спеціалістів, а діагностика прихованих маститів і зараз є складною задачею. Існуючі прилади та засоби автоматики визначення захворювання тварин маститом мають ряд недоліків, основні з яких: неможливість проведення діагностики в процесі доїння та використання значного процента ручної праці. Тому дослідження, які направлені на створення нових пристроїв та систем для визначення захворювання тварин маститом, на ранній стадії, з метою підвищення продуктивності тварин, зниження збитків в господарствах та своєчасного лікування, є актуальними [1].

Аналіз існуючих способів діагностики маститу [1, 2] показав, що для підвищення достовірності діагностики захворювання необхідно здійснювати контроль за декількома параметрами стану здоров'я тварини. Найбільш інформативними серед них є температура молока та хімічний склад, зміна якого впливає на електропровідність молока.

Тому при розробці автоматизованої системи діагностики маститу, основними параметрами визначення захворювання тварин маститом, були обрані два - електропровідність та температура молока.

Використовуючи ці два параметри була створена значна кількість пристроїв, однак недоліком використання таких розробок є те, що вони проводять діагностику шляхом порівняння поточних значень електропровідності та температури молока з середнім пороговим значення, встановленим для всього стада.

Тому враховуючи все вище наведене, нами був запропонований новий алгоритм діагностики захворювання тварин маститом [3], який полягає в наступному.

Так як, відомо, що електропровідність молока та температура залежить від породи, віку, умов утримання, і відповідно коливаються в наступних межах: електропровідність – від 0,35 до 0,65 См/м; а темпераутра від 37 до 38,5 ^{0}С, то для кожної здорової тварини, яка доється в стаді, запам'ятовується та зберігається значення електропровідності та температури молока. Потім при кожному доїнні ці значення порівнюються з поточними. При підвищенні електропровідності молока більш ніж на 15 % від найменшого значення електропровідності молока здорової тварини та

© В.О. Зубенко, В.О. Версаль. 2004

температури молока більш ніж на 0,5 ^{0}C в різних долях вимені реєструється захворювання тварини маститом.

Метою даної роботи є розробка, випробування та визначення ефективності роботи автоматичної системи діагностики захворювання тварин маститом на основі розробленого алгоритму.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень [4, 5] була розроблена структурна схема системи діагностики маститу (рис. 1). Вона складається з об'єкту контролю (тварини), двох вимірювально-обчислювальних каналів: температури молока (ТМ) та електропровідності молока (ЕМ) та блоку прийняття рішень (БПР). До складу ТМ входять датчик температури (ДТ) (терморегулятор включений у плече моста), аналогово-цифровий перетворювач АЦП та обчислювач В1. Канал ЕМ складається з індуктивної комірки ІК, АЦП та обчислювача В2. БПР – блок прийняття рішення, призначений для діагностики захворювання та формування сигналів: $S1$ – "хвора", $S2$ – "підозра", $S3$ – "здорова" в залежності від значення оцінок температури $\hat{t}^0$ та електропровідності χ, згідно з наступними алгоритмами.

$$S1 = \overline{Y}_1 \wedge \overline{Y}_2 \quad (1)$$

$$S1 = Y_1 \wedge \overline{Y}_2 \vee \overline{Y}_1 \wedge Y_2 \quad (2)$$

$$S1 = Y_1 \wedge Y_2 \quad (3)$$

де Y_1 – ознака не перевищення оцінкою $\hat{t}^0$ межі нормальної температури;

Y_2 – ознака неперевищення оцінкою χ максимально допустимого значення.

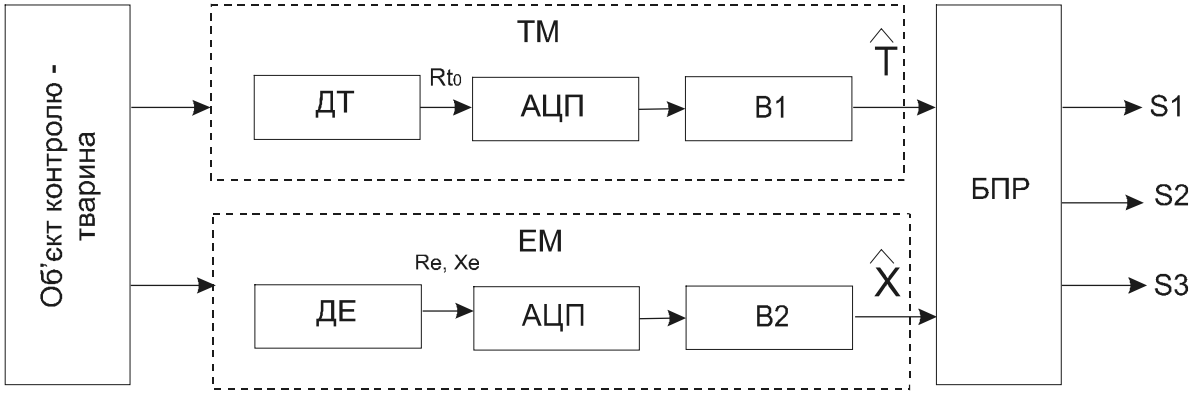


Рисунок 1 – Структурна схема мікропроцесорної системи діагностики мастита

Для проведення господарських випробувань був виготовлений переносний варіант системи діагностики маститу у корів, загальний вигляд якої приведений на рис. 2.

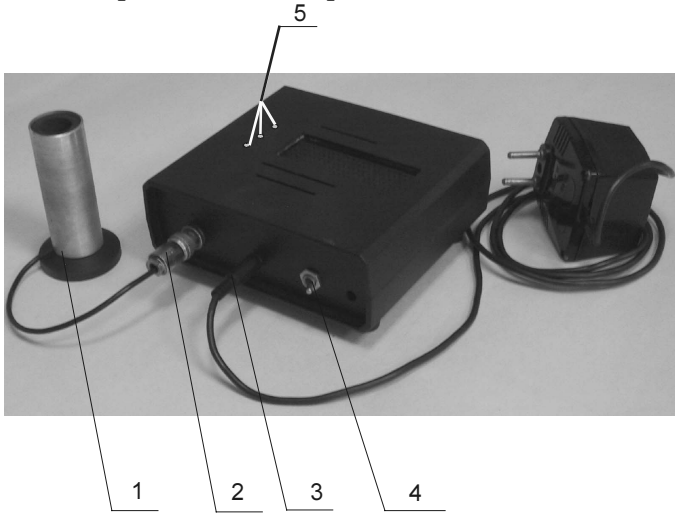
Пристрій складається з датчика електропровідності (1), вимірювального блоку та з'єднувального кабелю.

Корпус вимірювального блоку пристрою виконаний у вигляді короба із з'ємними верхньою і нижньою та боковими панелями. Всі елементи схеми вимірювального блоку пристрою розміщені на печатній платі.

На верхній панелі виконаний індикаторний отвір з червоним світлофільтром. Зліва від отвору зверху вниз розташовані світлові індикатори (5) – червоний, жовтий, зелений – для візуального спостереження за станом здоров'я тварини.

На боковій панелі вимірювального блоку розташовані гніздо 2 – для підключення датчика електропровідності з допомогою з'єднувального кабелю; гніздо 3 – для підключення пристрою до мережі 220 В; тумблер режиму роботи пристрою – 4, для

перемикання його в автономний режим та від мережі; гніздо, для підключення вимірювального блоку до центральної ЕОМ - розташоване на задній панелі.



1 – датчик електропровідності молока; 2 – гніздо для під'єднання з'єднувального кабелю з первинним перетворювачем електропровідності рідини; 3 – гніздо для підключення блоку живлення; 4 – тумблер для перемикання режиму живлення 12/220 В; 5 – світлові індикатори, які сигналізують про стан здоров'я тварини.

Рисунок 2 – Переносний варіант системи діагностики маститу у корів

Дослідження роботи пристрою діагностики маститу у великої рогатої худоби проводились на молочнотоварній фермі №1 фермерського господарства "Обрій", м. Новоукраїнка Кіровоградської області на групах корів червоно-степної породи з річним удоєм 2-3 тисячі кілограм при прив'язному їх утриманні. Доїння проводилось на установках ДАС-2Б зі збором молока в переносні відра. Досліди проводились в літньо-осінній період 2002 року.

На фермі досліджувалось поголів'я кількістю 150 тварин. Для дослідів використовувався переносний пристрій діагностики маститу у тварин (рис. 3).

1 – вимірювальний блок; 2 – первинний перетворювач електропровідності молока; 3 – первинні перетворювачі температури молока, вмонтовані в колектор.

Рисунок 3 – Господарські випробування системи діагностики маститу у корів

Датчик електропровідності молока, кріпився на молочному шланзі між колектором та пульсатором і з'єднувався з вимірювальним блоком пристрою з допомогою з'єднувального кабелю.

Датчики температури молока (4 шт. – для визначення температури кожної частки вимені), кріпились на вході в колектор доїльного апарату. Вимірювальний блок пристрою кріпився на кришці доїльного відра, так, щоб оператору машинного доїння було зручно спостерігати за його показами.

Перевірка тварин на мастит проводилась під час кожного доїння. При кожній перевірці складався список. Де відмічалась дата досліду, ім'я або номер тварини та результати дослідів.

Для перевірки отриманих результатів кожна тварина паралельно досліджувалась клінічно, на місці, перед початком доїння, а її молоко – лабораторно, після закінчення, з допомогою відомої проби димастин та проби відстоювання ветеринарним лікарем.

Результати проведених господарських досліджень приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Результати господарських досліджень.

№ п/п	Показники	Пристрій діагностики маститу	Димастін з пробою відстоювання
1.	Кількість перевірених тварин, гол.	150	150
2.	Кількість тварин з подразненням вим'я, гол.	3	1
3.	Кількість тварин з субклінічним маститом, гол.	43	42
4.	Кількість тварин хворих клінічною формою мастита, гол.	2	2
5.	Всього хворих тварин, гол	48	45

Розрахунковий економічний ефект від впровадження системи автоматичного визначення захворювання тварин маститом на молочнотоварній фермі, з поголів'ям стада, яке налічує 150 тварин складає 50548,94 грн.

Таким чином, в результаті проведеної роботи, була технічно реалізована та випробувана в господарських умовах, розроблена, на основі нового способу, автоматична система діагностики захворювання тварин маститом. Система проводить визначення маститу по двом параметрам електропровідності та температурі молока. Використання такої системи дозволить надати своєчасну ветеринарну допомогу тваринам та скоротити втрати в господарствах.

Список літератури

1. Оксамитний М.К. Субклінічні мастити у корів. – К.: Урожай, 1973. – 144 с.
2. Воскобойников В.М. Маститы коров.-Минск: Ураджай, 1981. - 135 с.
3. Пат. A61D7/00 Україна. Спосіб діагностування захворювання тварин маститом. Версаль В.О., Зубенко В.О. Заявл. 06.06.2000; Опубл. 17.06. 2002, Бюл. № 6, 2002 р.
4. В.О. Зубенко, В.О. Версаль, С.І. Осадчий. Динамічна модель індуктивного перетворювача для вимірювання концентрації провідної фракції в рідині. //Фізичні методи та засоби контролю середовищ матеріалів та виробів (серія), вип.9: Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів: Зб. наук. праць. – Львів: Фізико – механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. С. 147 – 150.
5. В.О. Версаль, С.І. Осадчий, В.О. Зубенко. Контрольно-вимірювальна система діагностики захворювання тварин маститом під час машинного доїння. //Вісник технологічного університету Поділля (Хмельницький державний університет) Ч. 1. Т.1. Науковий журнал 2. 2004. Хмельницький 2004 р. С.166 – 168.

УДК 007.681.3:621.311.24/.29

Р.В. Жесан, доц., канд. техн. наук, І.В. Флакей
Кіровоградський національний технічний університет

Аналіз сучасного програмного забезпечення для оцінки енергетичного потенціалу місцевості, моніторингу, керування та оптимізації вітрових електростанцій

У статті проведено аналіз сучасних програмних продуктів, що можуть бути використані при проектуванні вітроелектричних станцій. Розглядаються як програми для аналізу географічно-кліматичних умов місцевості, так і програми дистанційного керування обладнанням і моніторингу.
вітрова електростанція, вітроелектрична установка, програмний продукт, енергетичний потенціал, оптимізація

При проектуванні та будівництві нових вітрових електростанцій (ВЕС) вирішальним моментом є коректне оцінювання вітрового потенціалу перспективної площадки. Напрям переважаючих вітрів в районі будівництва впливає на розташування вітроелектричних установок (ВЕУ) на площадці та подальшу роботу станції, її ефективність і кількість електроенергії, що виробляється.

Для отримання об'єктивної картини щодо вітропотенціалу бажано мати довгострокові дані вимірювань вітрових характеристик (більше одного року): його швидкості та напрями, які ув'язані в часі. Ці вимірювання мають проводитися безпосередньо на площадці майбутньої ВЕС.

Сьогодні існує дефіцит докладної інформації. Основним джерелом даних про вітер поки що є дані, отримані на станціях Держметеослужби України. Але використання цієї інформації є придатним тільки на початкових етапах проектування ВЕС, коли необхідно отримати лише загальне (приблизне) уявлення про мікрокліматичну ситуацію в регіоні. Використання цих даних для визначення місцеположення ВЕУ на конкретному майданчику може призвести до помилкових рішень. Такі помилки були, наприклад, допущені при будівництві Аджигольської та Трускавецької ВЕС.

В зв'язку з цим постає питання про необхідність застосування сучасних програмних продуктів для аналізу наявних (повних чи неповних) даних про вітрові характеристики місця, оптимізації розташування ВЕУ та подальшого дистанційного спостереження та керування станцією.

На сьогодні існує ціла низка програм та комплексів, що можуть стати в пригоді при розв'язанні даного питання. Нажаль, через відсутність вітчизняних, неукраїнізованість західних програм та нестачу достовірної інформації, українським вітроенергетикам важко зробити вибір на користь конкретного продукту. Тому автори ставлять за мету оглядово ознайомити всіх зацікавлених з найдоступнішими програмами.

Серед найбільш досконалого і поширеного в світі програмного забезпечення слід виділити наступні:

- *WindFarm*;
- *WAsP*;

© Р.В. Жесан, І.В. Флакей. 2004

- *GH WindFarmer*;
- *Wind PRO*;
- *GEN Turbine*;
- *WindLogics;*
- *Meteonorm.*

Програмний комплекс *WindFarm* британської компанії ReSoft Ltd [1] нині широко впроваджується в Україні. Він взятий на озброєння Міжгалузевим науково-технічним центром вітроенергетики НАН України, який займається реалізацією Комплексної програми розвитку вітроенергетики та Національної енергетичної програми України (1998-2010 рр.) в частині використання енергії вітру.

WindFarm дозволяє оптимізувати розташування ВЕУ на площадці ВЕС з метою максимізації використання встановленої потужності та виробітку електроенергії. Для виконання цих робіт потрібні певні початкові дані:

1) Карта місцевості в цифровому вигляді. Програма має спеціальний блок, за допомогою якого на базі звичайної карти формується цифрова карта площадки у зрозумілому для програми форматі.

2) Характеристика підстилаючої поверхні. Спеціалізована функція дозволяє для кожної ділянки на площадці задати тип поверхні, який буде враховуватися під час обчислення характеристик вітрового потоку.

3) Файл вітрового потоку, який обчислений на базі характеристики підстилаючої поверхні. Особливості використання програми *WindFarm* для розрахунків, пов'язаних з врахуванням впливу топографії, передбачають попереднє створення файлу вітрового потоку, за допомогою якого виконується перерахування швидкості вітру для певної висоти і подальший розрахунок виробітку електроенергії. Файл вітрового потоку прив'язаний до місця розташування анемометру, на якому були заміряні метеодані, що використовуються при розрахунку кількості електроенергії.

4) Файл вимірів вітру на даній місцевості. Спеціальний блок дозволяє утворювати розу вітрів для подальшого використання при розрахунках. Початковими даними є дані про повторюваність швидкостей та напрямів вітру в часі. Довгостроковість цих даних, очевидно, є умовою якості їх використання.

На основі всіх перерахованих даних модуль оптимізації запропонує варіанти розташування ВЕУ, виходячи з максимізації використання встановленої потужності як окремих агрегатів, так і ВЕС в цілому [2].

Крім того *WindFarm* дозволяє створювати колажі, які поєднують у собі фотографічні зображення реальної місцевості та майбутньої ВЕС (рис. 1).

Іншим суттєвим програмним продуктом, створеним для потреб вітроенергетики, є *WAsP* датської корпорації Risø National Laboratory. В даний час пропагується версії *7.0* та *7.2* [3].

Ця розробка поширена в понад 70 країнах світу і може використовуватись із операційними системами Windows 95, 98, NT4, 2000. Вона дозволяє:

- проводити аналіз вітрових даних;
- відображати географічні карти та вітроатласи (велика база даних);
- прогнозувати та передбачати зміни кліматичних умов в регіоні;
- обраховувати виробництво енергії різними типами ВЕУ в конкретних місцевостях;
- надавати рекомендації з розміщення ВЕУ на ділянці проектованої ВЕС та ін.

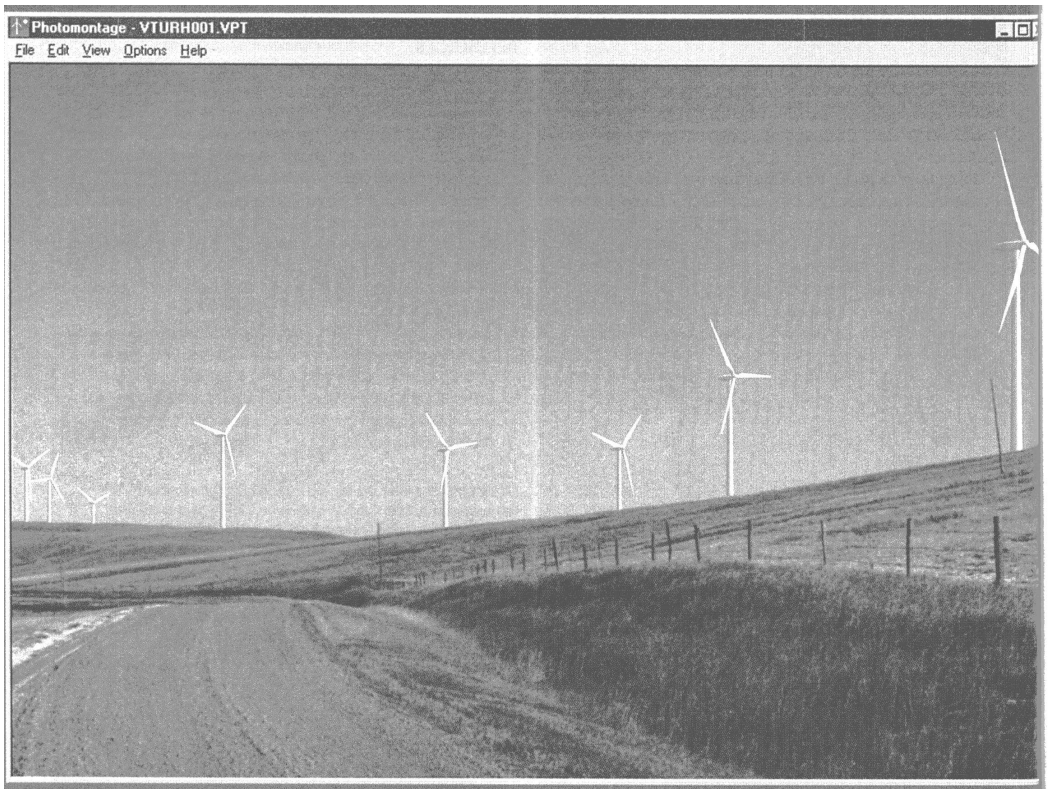


Рисунок 1 – Приклад колажу, створеного у WindFarm

На рис. 2 зображено зовнішній вигляд вікон в *WAsP 7.2*.

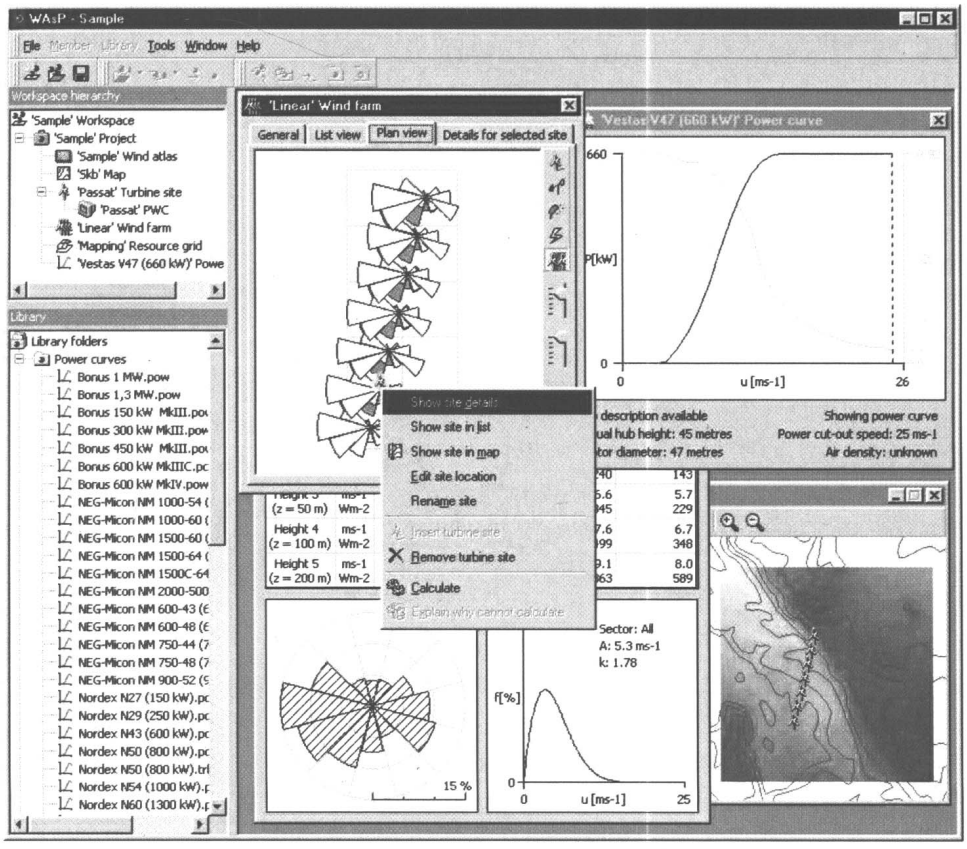


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд вікон в WAsP 7.2

Ціла низка програмних продуктів компанії Garrad Hassan and Partners Limited (Великобританія) об'єднані під загальною назвою *GH WindFarmer* [4]. Вони дозволяють здійснювати:

- всебічний, наперед узгоджений, аналіз енергетичних потоків (в тому числі й по окремих турбінах);
- визначення втрат, пов'язаних із змінами густини повітря та вихрових потоків;
- автоматичну оптимізацію розташування ВЕУ;
- будувати карти "затінення" установок при змінах напрямків вітру;
- визначення рівнів шумів та електромагнітних завад;
- високоякісну візуалізацію та фотомонтаж ВЕУ із конкретною місцевістю.

Головними складовими середовища *GH WindFarmer* є програми:

- *GH Bladed* (завантаження сертифікованих інструментів проекту);
- *GH Forecaster* (розширений інструмент прогнозування кількості вітрової та електричної енергії);
- *GH T-MON* (система накопичення даних про вітротурбіни);
- *GH SCADA* (здійснення загального керівництва ВЕС) та ін.

Зупинимось дещо докладніше на останній складовій. Системи *SCADA* випускаються не тільки Garrad Hassan and Partners Limited, але й багатьма іншими виробниками. Вони являють собою поєднання програмно реалізованих систем телекерування, телевимірювання та телесигналізації. Вона може працювати із ВЕС, розташованими компактно чи розсіяним на великій території (на узбережжях, в офшорних зонах тощо), а також із будь-яким іншим промисловим обладнанням, як правило розподіленими у просторі [5].

Сучасні *SCADA* (системи нагляду, керування та накопичення даних) зазвичай містять модулі передачі даних, що нерозривно пов'язані з контролерами кожної турбіни і всіх разом. Подібні модулі даних можуть бути інтегровані із підстанціями та метеодатчиками. Модулі збирають та зберігають пакети робочих даних, які періодично відсилаються на центральний комп'ютер (ЦК) під час опитування усіх модулів. Потім ЦК посилає інформацію на дисплеї моніторів та в базу даних. До баз даних, як і до миттєвих дані, можна попасти дистанційно. Сьогодні це можна робити через Інтернет. Таким чином, власники та оператори можуть отримувати інформацію про стан підстанцій, де б вони не знаходились. До того ж, ці системи використовують набір повідомлень про неполадки за допомогою біперів чи стільникових телефонів для того, щоб в разі неполадки можна було негайно прийняти відповідні заходи.

На рис. 3 наведено узагальнену діаграма потоків даних для *SCADA*-систем [5].

Хоча кожен пакет *SCADA* буде мати свої унікальні риси, всі вони повинні мати однакові основні характеристики:

- низький ступінь запізнення при повідомленні реальних критичних показників на центральний пункт;
- накопичення всіх даних по турбінах;
- відсутність втрат даних;
- дані, доступні на турбіні, у ЦК чи дистанційно.

Системи *SCADA* дають користувачу можливість доступу до реально-часової інформації від турбін, підстанцій і метеостанцій, тому дані можуть аналізуватись в будь-який момент часу.

Одним з найкращих існуючих на сьогодні комплексних пакетів програмного забезпечення для планування та проектування ВЕС є *WindPRO* компанії EMD (Данія) [6]. За відомостями з мережі Internet, цим пакетом користуються понад 600 компаній та установ у всіх куточках світу.

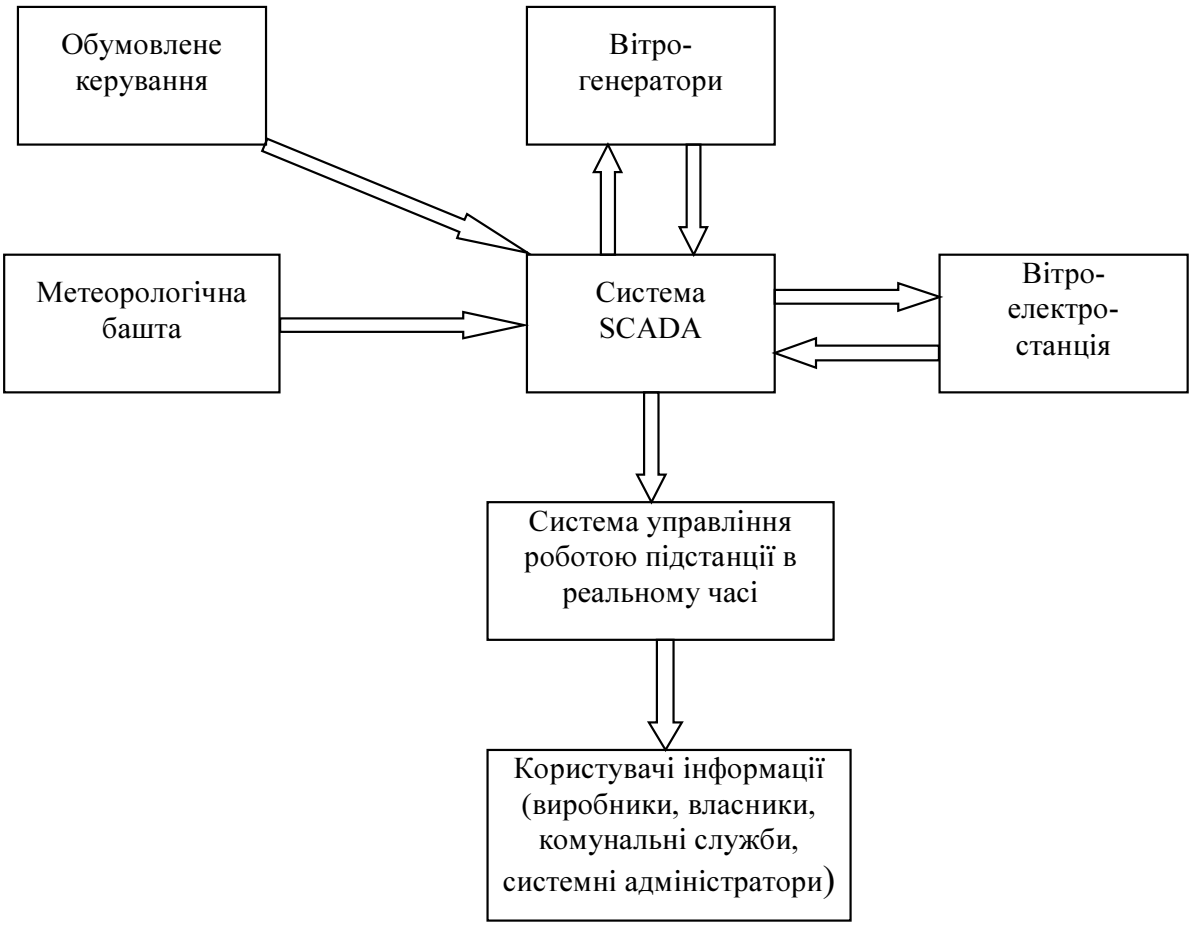


Рисунок 3 – діаграма потоків даних для SCADA-систем

WindPRO можна представити у вигляді кількарівневої будівельної конструкції, що складається із окремих блоків-“цеглинок” (рис. 4).

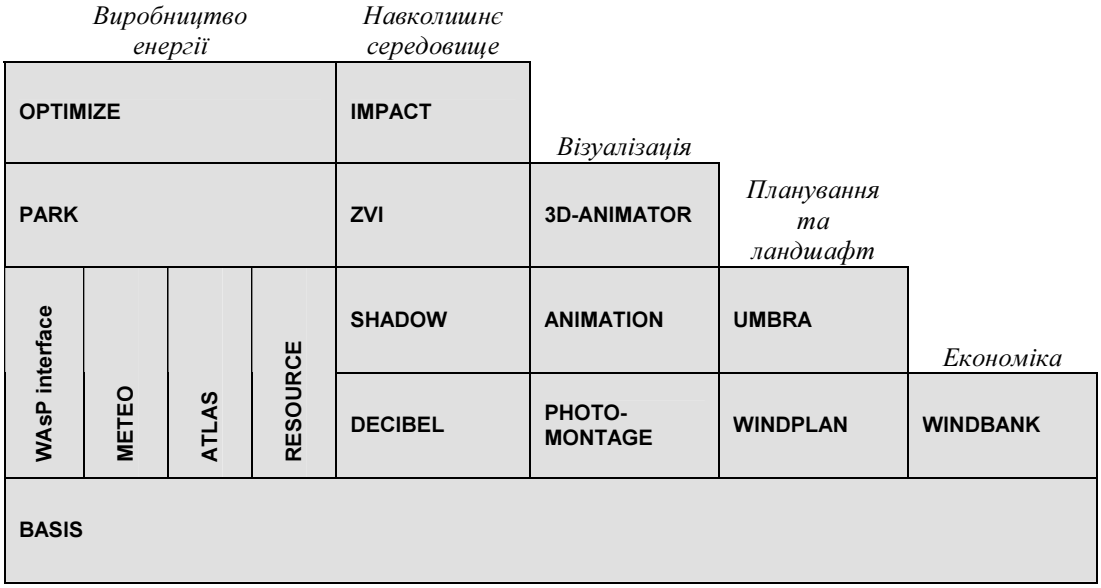


Рисунок 4 – структура пакету WindPRO

Модулі PARK та OPTIMIZE використовується для автоматичного планування та максимізації виробітку енергії. Дозволяють швидко сформувати парки ВЕУ із чіткими формами.

WAsP interface призначений для попередньої та подальшої обробки даних при складних розрахунках впливу підстилаючої поверхні.

Блок METEO призначений для аналізу проведення розрахунків накопичених метеоданих.

ATLAS – розрахунок вітрового атласу без використання WAsP.

RESOURCE – гнучкі розрахунки і представлення карт вітропотенціалу.

IMPACT дозволяє визначити вплив на навколишнє середовище кожного проектованого об'єкту.

ZVI розраховує зони візуального впливу ВЕС для окремих специфічних географічних районів.

SHADOW – блок для визначення затінення ВЕУ елементами рельєфу та одна одною.

DECIBEL – розрахунок шумів у відповідності з вимогами стандартів різних країн.

ANIMATOR та 3D-ANIMATOR дозволяють візуалізувати дані, здійснюючи "подорожі" штучно створеними ландшафтами.

PHOTOMONTAGE – створення колажів із елементів рельєфу та конструкцій ВЕС.

Модуль UMBRA дозволяє оцінити естетичні сторони ландшафту після спорудження ВЕС.

WINDPLAN – планування наявних вітрових ресурсів для конкретних моделей ВЕУ.

WINDBANK – модуль економічних оцінок та розрахунків.

BASIS – базовий блок (каталог ВЕУ, карти місцевості, засоби адміністрування тощо).

Ще одним з відомих на сьогодні програмних пакетів є *GEN Turbine*. Це новий, поки ще погано досліджений, програмний інструмент однойменної голландської компанії. За словами розробників, він призначений "для всіх, залучених до розвитку вітроенергетики" і створений при активній участі експертів-екологів.[7].

Основні пропозиції *GEN Turbine* наступні:

- кількісні обчислення енергії;
- розрахунки затінень;
- розрахунки шумів;
- візуалізація та статистичні представлення.

За інтерфейсом та основними можливостями програма схожа на *WAsP* та *GH SCADA*.

Крім "чистого" вітроенергетичного програмного забезпечення, корисними при проектуванні ВЕС можуть бути метеорологічні комп'ютерні продукти. Перш за все *WindLogics* та *Meteonorm*. Вони призначені для моделювання широкого спектру погодних умов і базуються на базах даних багаторічних спостережень основних метеостанцій світу. Дозволяють будувати наглядні 3D-прогнози в реальному масштабі часу (див., наприклад, рис. 5 [8]) і є особливо зручними при оцінці вітрових ресурсів великих регіонів. Проте в базах даних цих програм відсутні відомості з пострадянських територій.

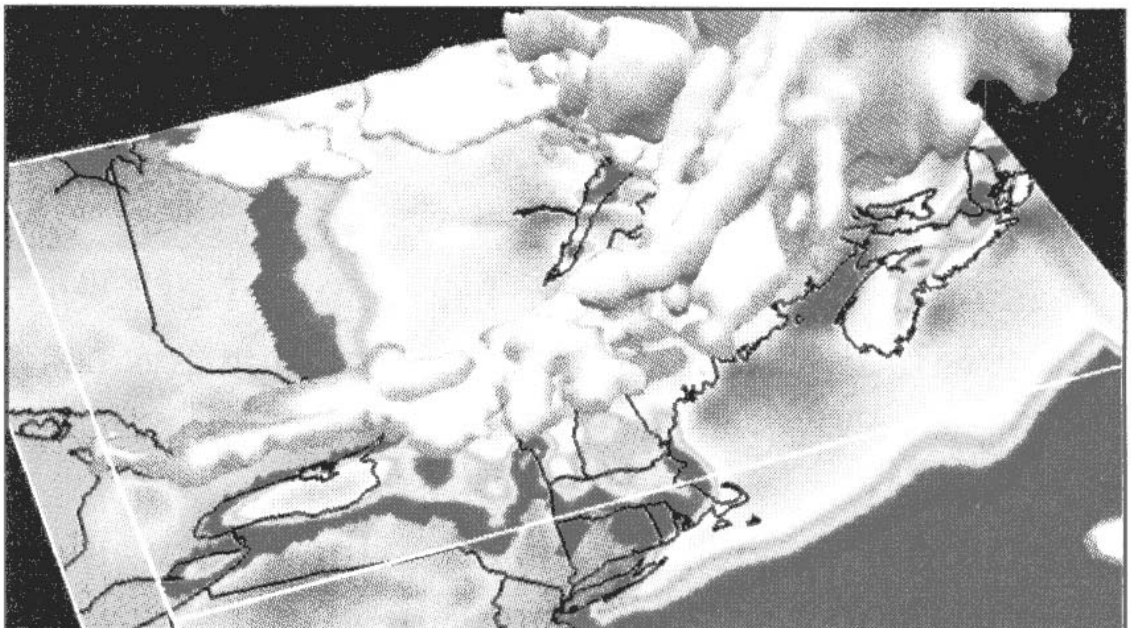


Рисунок 5 – 3D-візуалізація прогнозу погоди у реальному масштабі часу
в програмі WindLogics

Таким чином, на даний момент у світі існує велика кількість спеціалізованого програмного забезпечення, яке може бути використане при проектуванні ВЕС. Воно може не тільки допомогти в оцінці вітроенергетичного потенціалу, але й забезпечити моніторинг і дистанційне керування ВЕС після введення її в експлуатацію. Проте, всі існуючі програми потребують багаторазових метеорологічних вимірювань безпосередньо на ділянці майбутньої станції. Переважна більшість розробників вимагають, щоб ці вимірювання тривали не менше трьох років, утворюючи, таким чином, достатню для максимально точних розрахунків базу даних.

Практично всі виробники пропонують через мережу Internet демонстраційні варіанти своїх програм.

Список літератури

1. WindFarm // Renewable Energy World. – 2004. Vol. 7, № 4. P. 226.
2. Шульга С. В., Бурак М. А., Пепелов О. В. Методика розташування ВЕУ в умовах дефіциту даних по вітру // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали І-ї науково-практичної конференції (Львів, 31.05-01.06.2001 р.) – Зб. наук. статей. – Львів, ЛвЦНТЕІ, 2001. – С. 153-157.
3. WAsP 7.2. // Renewable Energy World. – 2002. Vol. 5, № 4. P. 89.
4. GH WindFarmer. // Renewable Energy World. – 2004. Vol. 7, № 1. P. 139.
5. Wind power on-line. SCADA for wind energy project management. // Renewable Energy World. – 2004. Vol. 7, № 2. P. 112-123.
6. WindPRO. // Renewable Energy World. – 2004. Vol. 7, № 2. P. 21.
7. GEN Turbine. // Renewable Energy World. – 2001. Vol. 4, № 3. P. 80.
8. WindLogics. // Renewable Energy World. – 2004. Vol. 7, № 4. P. 77.

УДК 658.011.56.636.744

В.І. Гуцул, М.О. Шалімова, В.О. Шалімов
Кіровоградський національний технічний університет

Елементи математичної моделі дозатора сипких матеріалів із трьохплечовим коромислом

Розглянуті основні елементи математичної моделі дозатора сипких матеріалів, коромисло якого має три плеча. Зроблені розрахунки для конкретної моделі дозатора при різних значеннях деяких його параметрів та різних режимах завантажування. Показано, що при виконанні певних умов диференціальне рівняння обертального руху коромисла можна замінити звичайним рівнянням балансу моментів, яке не враховує динамічних ефектів. Розглянуто вплив можливих коливань продуктивності витікання матеріалу на роботу дозатора.

дозатор, режим завантажування, диференціальне рівняння руху, рівняння балансу моментів

Основою будь-якого дозатора є система елементів, яка безпосередньо відповідає за приймання та зважування матеріалу. У теперішній час існує багато високоточних систем вказаного типу, але більшість з них є досить складними, а отже і дорогими. Запропонована система з одного боку забезпечує прийнятну для багатьох технологічних процесів точність, а з другого, вона є досить простою (дає можливість автоматизувати процес дозування без застосування комп'ютерних технологій), а отже і дешевою.

У даній роботі досліджується математична модель запропонованої системи елементів дозатора сипких матеріалів. Коромисло дозатора має три плеча. Два з них (ліве і праве) розміщені уздовж однієї прямої, а третє (вертикальне) – під прямим кутом до цієї прямої. На одне горизонтальне (ліве) плече підвішується приймальний бункер, а на два інші жорстко кріпляться гирі. Система містить демпфер, один кінець якого шарнірно кріпиться на основі, а другий – на горизонтальному (правому) плечі. У момент завершення циклу завантажування демпфер і вертикальне плече займають строго вертикальне положення.

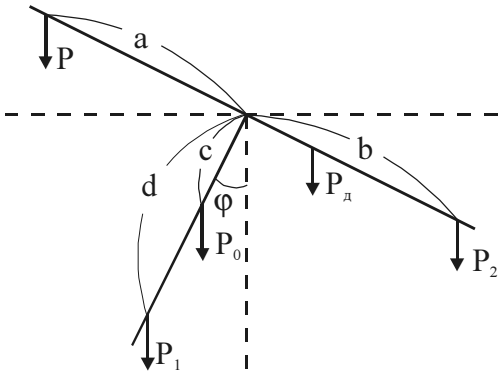


Рисунок 1 - Схема діючих сил

Схема діючих на коромисло сил зображена на рис. 1. Сила P обумовлена дією приймального бункера і є змінною величиною. Вона визначається вагою приймального бункера, масою матеріалу, що загрузився, та тиском падаючого матеріалу. Сили P_1 і P_2 визначаються діями гирь, які жорстко кріпляться на вертикальному та правому плечі відповідно. Вага гирі правого плеча повинна урівноважувати сумарну вагу однієї порції матеріалу та приймального бункера. За допомогою гирі вертикального плеча регулюється початковий кут повороту коромисла. Сили P_0 (точкою її прикладання є центр мас коромисла) і $P_д$ відповідно визначаються вагою коромисла і дією демпфера.

Рівняння руху для подібної системи у загальному випадку має вигляд

$$J\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \Sigma M\,, \qquad (1)$$

© В.І. Гуцул, М.О. Шалімова, В.О. Шалімов. 2004

де J – зведений момент інерції;

ΣM – сума моментів усіх діючих сил.

У нашому випадку будемо мати

$$J = J_0 + (m + m_3)a^2 + m_2 b^2 + m_1 d^2, \tag{2}$$

$$\Sigma M = ((m + m_3 + \frac{P_4}{g})a - bm_2)g\cos\varphi - (cm_0 + dm_1)g\sin\varphi - \eta\cos\varphi\frac{d\varphi}{dt}, \tag{3}$$

де m_0, m_3 – маса коромисла та приймального бункера відповідно;

m_1, m_2 – маса гирі вертикального та правого плеча відповідно;

m – маса матеріалу, що загрузився;

P_4 – сила тиску стовпа падаючого матеріалу;

η – числовий коефіцієнт, який визначає дію демпфера;

g – прискорення вільного падіння.

Значення маси m визначається продуктивністю Q (при сталій продуктивності $m = Qt$). Величина P_4 задається формулою [1]

$$P_4 = \lambda Q v, \tag{4}$$

де λ – параметр, значення якого залежать від матеріалу та висоти падіння;

v – швидкість матеріалу у момент падіння.

Враховуючи рух приймального бункера, можемо записати

$$v = \sqrt{2gH + v_0^2} - a\cos\varphi\frac{d\varphi}{dt}, \quad H = H_0 + a(\sin\varphi - \sin\varphi_0) - \frac{m}{\rho S}, \tag{5}$$

де H_0 – висота падіння матеріалу у початковий момент часу;

H – висота падіння матеріалу у момент часу t;

ρ – густина матеріалу;

S – площа поперечного перерізу приймального бункера;

v_0 – початкова швидкість падаючого матеріалу;

φ_0 – початковий кут повороту коромисла.

Складемо, далі, рівняння балансу моментів даної системи, яке, на відміну від рівняння (1), не враховує динамічних ефектів процесу завантажування:

$$((m + m_3)a - bm_2)\cos\psi - (cm_0 + dm_1)\sin\psi = 0, \tag{6}$$

де ψ – кут повороту коромисла (при вказаному підході).

Диференціальне рівняння (1) визначає реальний зв'язок між масою m матеріалу у бункері і кутом φ повороту коромисла, але воно є досить складним і не має аналітичного розв'язка. Рівняння (6) лише наближено описує рух системи (зміна маси m призводить до зміни кута ψ), але воно дає можливість безпосередньо виміряти масу m кутом ψ. Проведемо, далі, порівняльний аналіз розрахунків, зроблених на основі рівнянь (1) і (6), та з'ясуємо, при яких умовах здобуті результати співпадають з потрібною точністю. Іншими словами, визначимо умови (якщо такі існують), при яких динамічними ефектами можна знехтувати і диференціальне рівняння (1) замінити звичайним рівнянням (6).

Розрахунки робилися для дозатора з однією порцією 0,5 кг. Потрібні нам величини мають наступні значення: $a = b = d = 0.12$ м, $c = 0.0142$ м, $m_0 = 0.533$ кг, $m_1 = 0.8$ кг, $m_2 = 0.65$ кг, $m_3 = 0.15$ кг, $J_0 = 0.00247$ кг·м2, $H_0 = 0.17$ м, $v_0 = 0$ м/с, $S = 0.0081$ м^2, $\rho = 800$ кг/м^3, $\lambda = 0.5$. Легко бачити, що початковий кут φ_0 визначається рівністю

$$\varphi_0 = arctg\frac{am_3 - bm_2}{cm_0 + dm_1}. \tag{7}$$

Відмітимо, що значення φ_0 бажано брати не більше $\pi/4$.

Рівняння (1) розв'язувалося методом Рунге-Кутта 4-го порядку. Так як маса m є відомою функцією часу t (закон зміни продуктивності Q задаємо), то здобуваємо залежність $\varphi = \varphi(m)$. Подібну залежність визначає і рівняння (6). Відносна різниця маси матеріалу у бункері визначається рівністю

$$\delta = \frac{|m_\varphi - m_\psi|}{m}, \qquad (8)$$

де m_φ і m_ψ – маси, які відповідають даному куту повороту коромисла (моменту часу t) і які обчислені на основі рівнянь (1) і (6) відповідно.

Розрахунки були зроблені для різних значень деяких параметрів дозатора та для різних режимів завантажування бункера. Найбільш типові результати обчислень показані за допомогою графіків функцій $\varphi = \varphi(t)$ (інтегральні криві рівняння (1)), $\frac{d\varphi}{dt} = \varphi'(t)$ і $\delta = \delta(t)$. Для побудованих кривих з метою вибору зручного масштабу покладалося що $\delta = 0.4$, якщо $\delta > 0.4$. Спочатку розглянемо випадок, у якому система не містить демпфера (у формулі (3) параметр η дорівнює нулю). На рис. 2 показані результати для двох різних значень продуктивності Q.

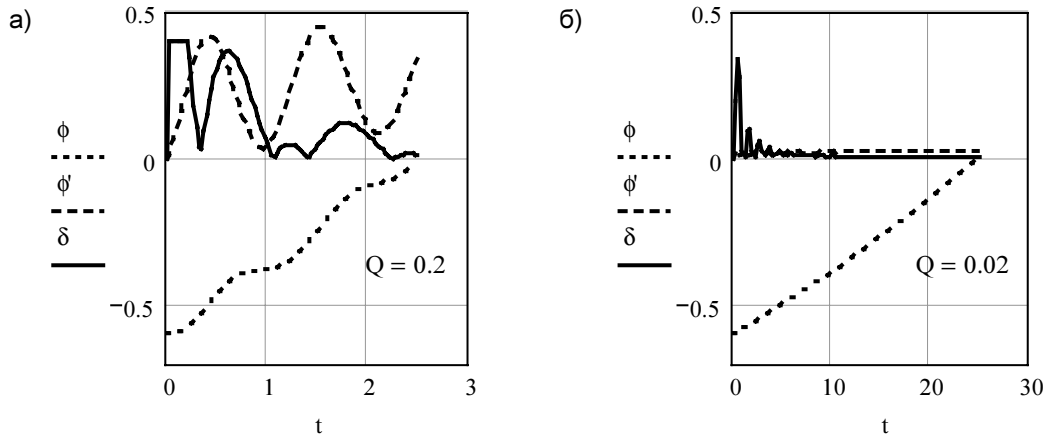


Рисунок 2 – Закон руху коромисла та значення відносного відхилення δ при η=0

Як бачимо, при високій продуктивності (рис 2, а) швидкість руху коромисла змінюється у досить широких межах і результати, здобуті на основі рівнянь (1) і (6) суттєво відрізняються між собою. У випадку низької продуктивності (рис. 2, б) рух коромисла відбувається при незначних коливаннях швидкості і вказані вище результати близькі між собою. Зрозуміло, що у останньому випадку зважування однієї порції займає занадто багато часу.

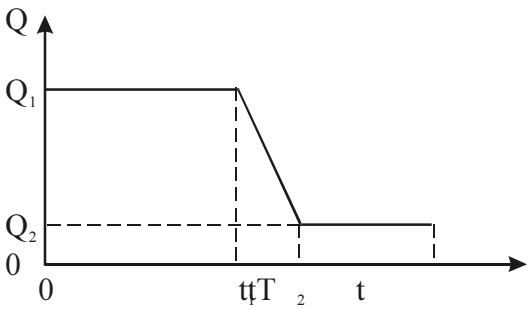


Рисунок 3 - Комбінований режим завантажування

Розглянемо, далі, комбінований режим завантажування (рис. 3): на першому етапі $Q = Q_1$; на другому $Q = Q_1 + \frac{Q_2 - Q_1}{t_2 - t_1}(t - t_1)$; на третьому $Q = Q_2$. Тут мається на увазі, що спочатку основна частина порції загружається при високій продуктивності Q_1 (перший етап), а потім відбувається перехід до низької продуктивності Q_2 (другий етап), при якій і завершується цикл завантажування (третій етап). Комбінуючи значення параметрів Q_1, Q_2, t_1, t_2 можна добитися оптимального співвідношення між часом T завантажування однієї порції та точністю вимірювання δ.

На рис. 4 наведено результати обчислень при Q_1 = 0.2 кг/с, Q_2 = 0.03 кг/с, t_1 = 1.8 с, t_2 =2 с. Зроблені обчислення показали (рис. 4, а), що при відсутності демпфера значні коливання швидкості, які виникають на перших двох етапах (особливо на другому, під час різкого зниження продуктивності), залишаються і на третьому. Величина δ, яка характеризує міру відхилення наближеного результату від точного, приймає досить великі значення на протязі усього циклу завантажування. У зв'язку із сказаним у систему було введено демпфер.У останньому випадку (рис. 4, б) відносна різниця мас на кінцевому проміжку циклу завантажування не перебільшує 0.4%. Розрахунки були зроблені для різних значень параметра η, який характеризує роботу демпфера. Так, при $0.04 \le \eta \le 0.1$ величина δ на кінцевому проміжку залишалася меншою за 0.007.

Диференціальне рівняння (1) містить параметр λ, який характеризує матеріал, що зважується. Рівняння (6) цього параметра не містить, тобто воно не прив'язується до конкретного матеріалу. Були зроблені обчислення, у яких значення величини λ варіювалося від 0.4 до 0.9 (цьому проміжку належать можливі значення λ). Здобуті результати практично не відрізняються між собою. Отже, процес дозування при даному підході не залежить від матеріалу, що дозується.

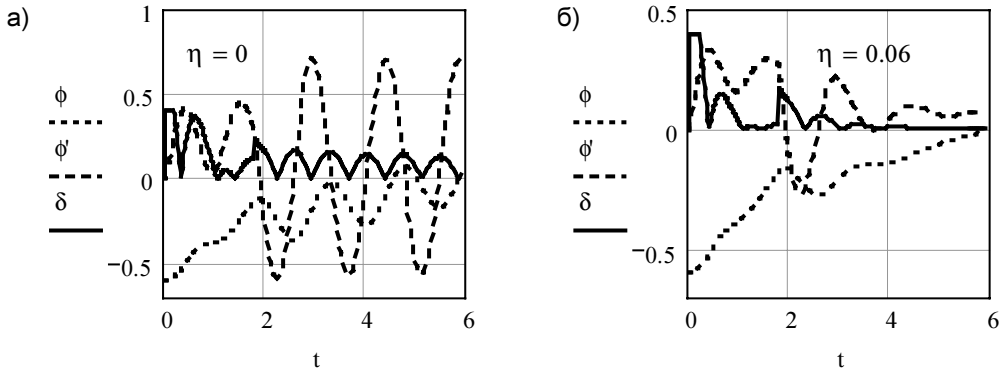


Рисунок 4 – Закон руху коромисла та значення відносного відхилення δ при комбінованому режимі завантажування

Реально у тих випадках, коли ми вважаємо, що продуктивність завантажування залишається сталою, завжди відбуваються деякі її коливання. З метою вивчення впливу цех коливань на точність зважування розглянемо наступний, синусоїдальний закон зміни продуктивності:

$$Q = Q_0(1 + \mu \cos 2\pi\omega t). \qquad (9)$$

В таблиці 1 показані результати розрахунків, зроблених для деяких значень параметрів Q_0, μ і ω (μ – амплітуда коливань, ω – частота). У даній таблиці наведені найбільші значення відносної різниці δ на кінцевому відрізку інтервалу часу завантажування. Довжина вказаного відрізку дорівнює п'ятій частині довжини цього інтервалу. Перші значення відповідають Q_0 = 0.03 кг/с, а другі – Q_0 = 0.2 кг/с. У всіх випадках η = 0.06. Як і слід було очікувати, із збільшенням амплітуди μ збільшується і величина δ. При збільшенні частоти ω значення δ зменшуються. Для Q = 0.03 кг/с тільки у двох з наведених шістнадцяті варіантів вказана відносна різниця мас перебільшує 0.5 %.

Зроблені дослідження показують, що при виконанні певних умов маса матеріалу у приймальному бункері з достатньо високою точністю виміряється кутом повороту коромисла (відповідні розрахунки можна робити без урахування динамічних ефектів). Це дає принципову можливість для управління та автоматизації процесу

завантажування. У потрібні моменти часу, при певних значеннях вказаного кута, можна змінювати значення продуктивності та завершувати цикл завантажування.

Таблиця 1 – Аналіз значень відносного відхилення δ при синусоїдальній формі зміни продуктивності

ω \ μ	0.05	0.1	0.2	0.5
1	0.0014 | 0.0085	0.0028 | 0.0172	0.0056 | 0.0360	0.0141 | 0.0932
2	0.0004 | 0.0056	0.0007 | 0.0058	0.0014 | 0.0075	0.0035 | 0.0205
5	0.0001 | 0.0061	0.0002 | 0.0067	0.0005 | 0.0080	0.0012 | 0.0119
10	0.0001 | 0.0057	0.0001 | 0.0060	0.0002 | 0.0067	0.0006 | 0.0086

Основні висновки

1. Для запропонованої системи елементів дозатора при певних (відносно малих) значеннях продуктивності динамічними ефектами можна знехтувати і положення коромисла визначати за допомогою звичайного рівняння балансу моментів.

2. Підбір відповідних значень параметрів дозатора та режиму завантажування дозволяє забезпечити: а) стабільний рух коромисла на кінцевій стадії циклу завантажування (рух відбувається у одному напрямку при незначних коливаннях швидкості); б) потрібний час завантажування та достатньо високу точність.

3. Кінцеві результати розрахунків практично не залежать від характеристик дозованого матеріалу. Отже, даний дозатор без будь-якого корегування може використовуватися для зважування різних сипких матеріалів.

4. Запропонована система є стійкою відносно можливих незначних коливань продуктивності витікання матеріалу.

5. Управління та автоматизація процесу завантажування може базуватися на законі руху коромисла.

Список літератури

1. Карпин Е.Б. Средства автоматизации для измерения и дозирования массы. – М.: Машиностроение, 1971. – 469 с.

УДК 62.505

С.І. Осадчий, доц., канд. техн. наук, О.А. Саула, асп., В.І. Гуцул, доц., канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Модель динаміки каналу передачі даних як елемента системи автоматизації виробничого процесу

Наведені передаточна функція радіорелейного каналу зв'язку, спектральна щільність власних шумів визначені в результаті експерименту та методика ідентифікації такого класу систем.
передаточна функція, дисперсія, кореляційна функція, спектральна щільність, ідентифікація

З багатьох літературних джерел відомо, що до більшості систем автоматизації входять нелінійні складні об'єкти, які функціонують у стохастичних умовах, тому їх необхідно розглядати як такі, що самоорганізуються за Фельдбаумом [1].

Окремим екземпляром цих об'єктів є сучасний канал передачі даних, в якому здійснюються нелінійні перетворення сигналів та існують стохастичні корисні сигнали, завади та шуми. При роботі в реальних експлуатаційних умовах канал, як динамічний об'єкт, у відповідності до конструкції та умов роботи обирає деяку траєкторію з множини можливих. Тому, вигляд та параметри його математичної моделі повинні визначатися або уточнюватися в умовах наближених до реальних в результаті рішення задачі ідентифікації [2]. Побудовані у такий спосіб моделі дозволять створювати оптимальні гарантуючи системи передачі телеметричної інформації.

Стаття присвячена розробці методики ідентифікації та оцінюванню передаточної функції $W_k(s)$ та спектральної щільності $S_{ee}(s)$ власних шумів каналу зв'язку, побудованого на базі радіорелейної станцій Р-415.

На сьогодні відомо багато методів ідентифікації динамічних моделей систем [3]. Їх головним недоліком є чутливість результату до похибок апаратури реєстрації. В даній роботі застосовано спектральний метод структурної ідентифікації обґрунтований в [4]. Цей метод малочутливий до власних шумів апаратури реєстрації та дозволяє з мінімальною дисперсією похибки в результаті обробки даних спостережень за входом та виходом об'єкта оцінити його передаточну функцію та неконтрольоване збурення, яке діяло під час спостережень.

У відповідності з обраним методом методика ідентифікації каналу передачі телеметричних даних складається з декількох етапів:

- аналіз технічних характеристик та експлуатаційних умов (АТХ);
- вибір апаратури та складання структурної схеми експериментальної установки (ССС);
- монтаж та налагодження системи реєстрації даних (ЗН);
- реєстрація сигналів на вході і виході каналу (РС);
- первинна обробка отриманих даних (ПО);
- спрощення оцінок спектральних щільностей та визначення шуканих $W_k(s)$ і $S_{ee}(s)$ відповідно алгоритму з [4](ИДН);
- аналіз якості ідентифікації (АЯ).

Аналіз технічних характеристик та умов роботи радіорелейних станцій показав, що для наближення умов експерименту до реальних експлуатаційних необхідно в якості джерела корисного сигналу використати генератор шуму П-219 (генератор

© С.І. Осадчий, О.А. Саула, В.І. Гуцул. 2004

"білого" шуму в полосі частот 0 – 5 кГц), а в якості навантаження виходу каналу - активний резистор R=600 Ом. Схема підключення апаратури збору інформації наведена на рис. 1. ПЕОМ на схемі підключена до об'єкту досліджень з допомогою звукової карти та призначена для реєстрації сигналів на вході і виході каналу, первинної та вторинної обробки експериментальних даних (рис.2).

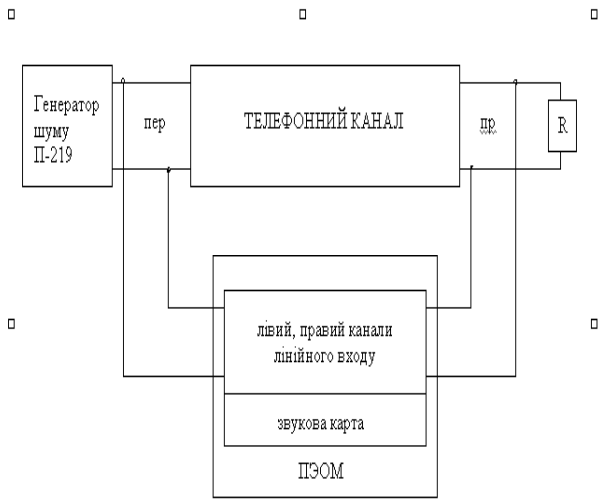


Рисунок 1- Структурна схема підключення каналу для ідентифікації

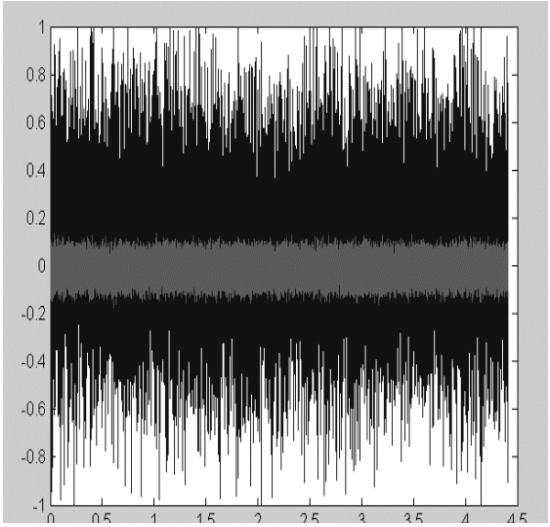


Рисунок 2 - Реалізація вхідного та вихідного сигналів

В результаті первинної обробки реалізацій вхідного $u(t)$ та вихідного $x(t)$ сигналів на основі алгоритму Блекмена-Тьюкі [5] знайдені спектральні щільності вхідного сигналу $S_{uu}(s)$, вихідного сигналу $S_{xx}(s)$ та взаємна спектральна щільність $S_{ux}(s)$ (рис. 3 - рис. 5) у вигляді:

$$S_{uu}(s) = \frac{2.59e4 \cdot \sigma_u^2 \left| s + 2.15e4 \right|^2}{\pi \left| s^2 + 3.82e4s + 8.913e8 \right|^2}, \tag{1}$$

$$S_{xx}(s) = \frac{1.5e4 \cdot \sigma_x^2 \left| (s + 1.48e4)(s + 645.8) \right|^2}{\pi \left| (s + 2369)(s^2 + 2e4s + 4.54e8) \right|^2}, \tag{2}$$

$$S_{ux}(s) = \frac{1912 \cdot \sigma_u \cdot \sigma_x (s + 1.5e4)(-s + 1.26e4)(s^2 + 5594s + 2.9e8)}{\pi \left| s^2 + 9e3s + 1.8e8 \right|^2 (s^2 + 3438s + 2.98e8)}, \tag{3}$$

де $\sigma_u = 0.0537$ В – середньоквадратичне відхилення вхідного сигналу;

$\sigma_x = 0.313$ В – середньоквадратичне відхилення вихідного сигналу.

Основу для пошуку $W_k(s)$ та $S_{ee}(s)$ склав алгоритм, розроблений в [2,4], у відповідності з яким шукана оптимальна матриця оцінок визначається як

$$\Phi = [W_k, S_{ee+}] = R_0^{-1}(T_0 + T_+)D^{-1}, \tag{4}$$

де R_0 - результат факторизації [2] вагового коефіцієнта R (для каналу зв'язку $R_0 = 1$);

D - результат факторизації блочної матриці S_{yy}, такий що

$$D \cdot D_* = S_{yy} = \begin{bmatrix} S_{uu} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{5}$$

$T_0 + T_+$ - стійка частина результату сепарації блочної дрібно-раціональної матриці

$$T = T_0 + T_+ + T_- = R_0 S_{yx} D_*^{-1}; \quad (6)$$

“*”- знак Ермітового спряження матриць [7];

S_{yx} - матриця взаємних спектральних щільностей:

$$S_{yx} = (S_{ux}, S_{\Delta x}); \quad (7)$$

$S_{\Delta x}$ - результат факторизації рівняння зв’язку

$$S_{x\Delta} \cdot S_{\Delta\Delta} \cdot S_{\Delta x} = S_{xx} - S_{xu} \cdot S_{uu}^{-1} \cdot S_{ux}. \quad (8)$$

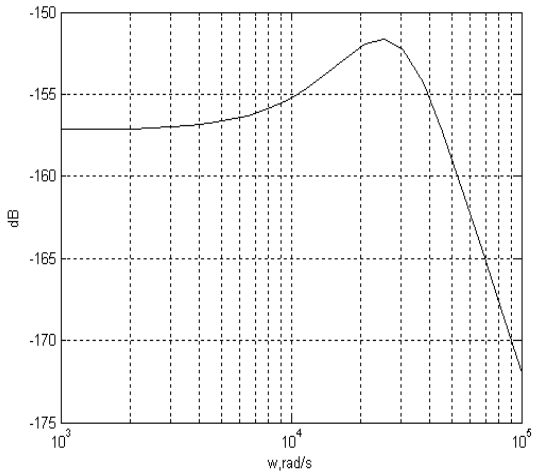


Рисунок 3 - Спектральна щільність вхідного сигналу

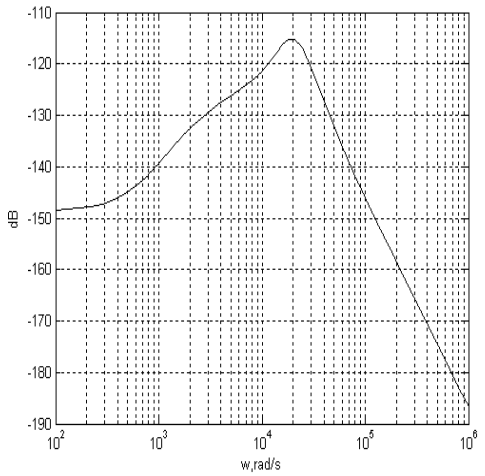


Рисунок 4 - Спектральна щільність вихідного сигналу

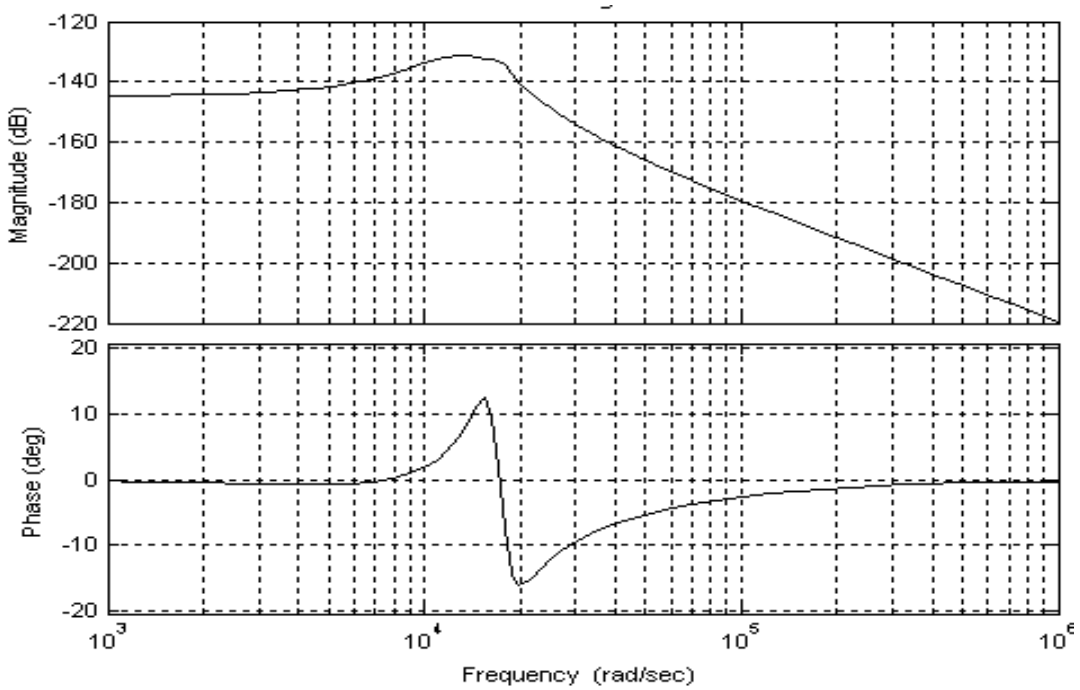


Рисунок 5 - Взаємна спектральна щільність

В результаті підстановки спектральних щільностей з (1)-(3) у алгоритм (5)-(8) визначені: передаточна функція каналу зв'язку $W_k(s)$ у вигляді:

$$W_k(s) = \frac{2.66(s+8166)(s^2+3.82e4s+8.9e8)}{(s+2.15e4)(s^2+9000s+1.8e8)}, \quad (9)$$

та спектральна щільність неконтрольованого власного шуму каналу:

$$S_{ee}(s) = S_{ee+} \cdot S_{ee-} = \left| \frac{30.38(s+1.48e4)(s+1429)(s^2+1.3e4s+1.49e8)}{(s+2369)(s^2+9000s+1.8e8)(s^2+2e4s+4.54e8)} \right|^2. \quad (10)$$

Аналіз частотних характеристик каналу зв'язку (рис.6) показав, що радіорелейний канал зв'язку є лінійним динамічним об'єктом зі смугою пропускання 0,3-3 кГц та коефіцієнтом підсилення у ній близьким до 10 дБ, що не протирічить технічним характеристикам Р-415.

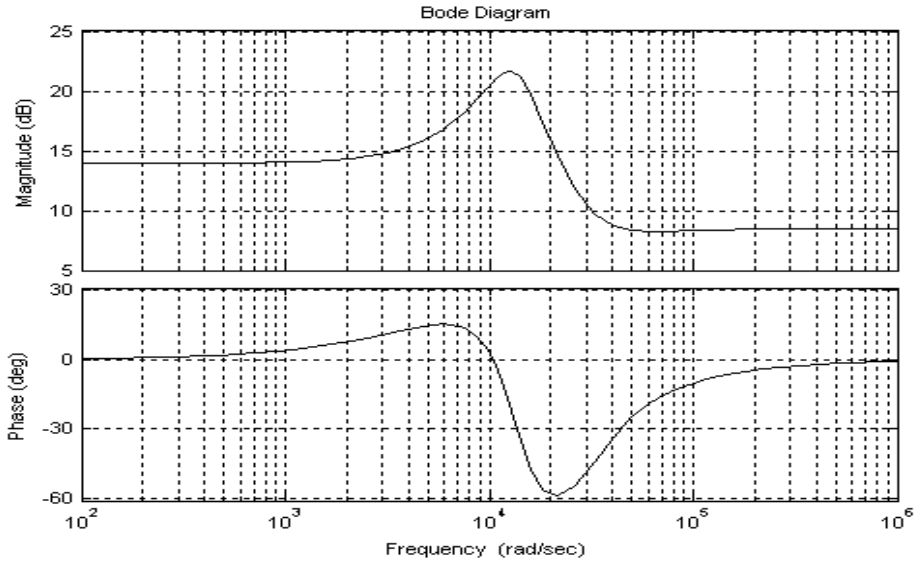


Рисунок 6 - Частотні характеристики радіо-релейного каналу

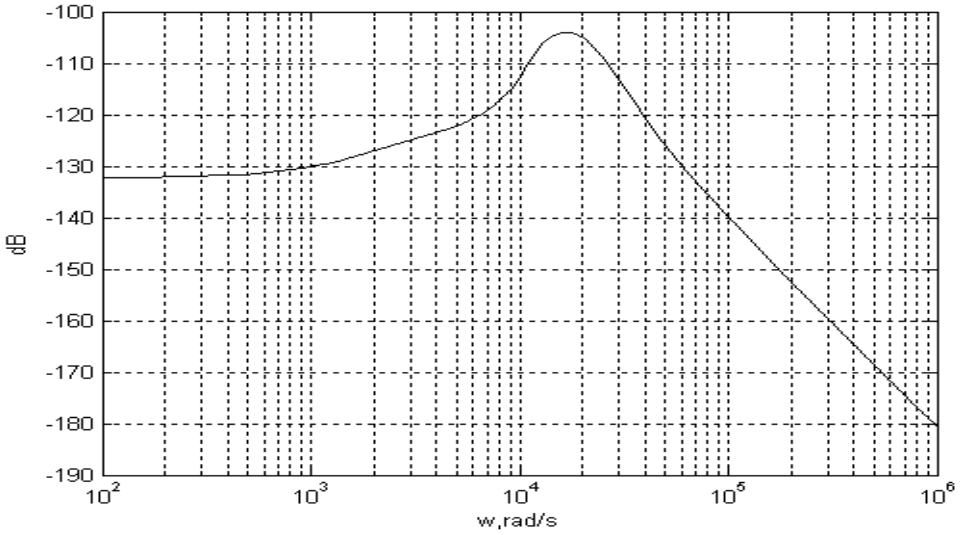


Рисунок 7 - Спектральна щільність власного шуму радіо-релейного каналу

Власний шум каналу являє стаціонарний випадковий процес з нульовим математичним очікуванням та дробно-раціональною спектральною щільністю (10). Практична ширина його спектру знаходиться в смузі пропускання каналу (рис.7).

Основу для аналізу якості ідентифікації моделі динаміки каналу у відповідності з [2,4] складає наступний інтеграл

$$e = \frac{1}{j} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} tr[(S_{xx} - S_{yx}\Phi_* - \Phi S_{xy} + \Phi S_{yy}\Phi_*)R]ds, \qquad (11)$$

де $j = \sqrt{-1}$;

tr - слід матриці. Фізичний зміст показника *e* - дисперсія похибки ідентифікації. Його значення для отриманої моделі не перевищує 0,01.

Таким чином, отримана методика виконання активної ідентифікації каналів зв'язку в умовах наближених до реальних. Визначені передаточна функція лінійного наближення динамічної моделі каналу зв'язку створеного на базі станцій Р-415 та спектральна щільність власного шуму каналу при стохастичному вхідному сигналі, які складають основу для рішення цілої низки науково-технічних задач: порівняльний аналіз каналів, оптимізація їх якості та синтез систем передачі телеметричної інформації.

Список літератури

1. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальних автоматических систем.- М.: Наука, ФМ, 1966. – 623 с.
2. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління – К.: НАУ, 2003. – 208 с.
3. Киричков В.Н. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами/ Под ред. А.А. Краснопрошиной - К.: Наук.думка, 1987. – 263 с.
4. Блохин Л.Н. Оптимальные системы стабилизации – К.: Техника, 1982. – 144 с.
5. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
6. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц.- М.: Наука, 1988. – 552 с.

УДК 664.65

Ю.О. Єрмолаєв, О.В. Сидоренко
Кіровоградськи національний технічний університет
М.О. Окольчишен
Головний інженер ВАТ "Кіровоградського хлібозаводу №3"

Аналіз рівня автоматизації початкових стадій технологічного процеса хлібозавода №3

Проблема покращення якості хлібобулочних виробів без суттєвих капітальних затрат встає перед поглядом виробника. В статті розглянутий аналіз рівня автоматизації технологічного процесу перших стадій приготування продукта. Аналіз виконується з точки зору використання автоматичних приборів для контроля процесу приготування рідкої опари з наступним використанням сигналів, як для діагностики так і для випрацювання управляючих дій від мікропроцесора.
технологічний процес, борошно, сольовий розчин, дріжджі, опара, тісто, хліб

Хліб є основним продуктом харчування населення при цьому якість його значно впливає на здоров'я людей. Крім цього якість хліба визначає і міру його вживання населенням, звідси і доходи підприємства.

Хлібозавод №3 м.Кіровограда є основним постачальником хлібопродуктів для міста. При цьому рівень механізації і автоматизації заводського обладнання і систем на сучасному етапі впливає на виробництво і якість хліба.

Весь технологічний процес приготування хліба можна умовно розділити на п'ять стадій:

1. Підготовка сировини.
2. Приготування рідкої опари.
3. Заміс тіста.
4. Поділ тіста на шматки.
5. Випечка хліба.

Крім цих основних п'яти стадій є ще декілька – це бродіння опари, округлення тістових заготовок, розстойка тістових заготовок, охолодження і зберігання хліба, які теж дуже впливають на процес приготування хліба.

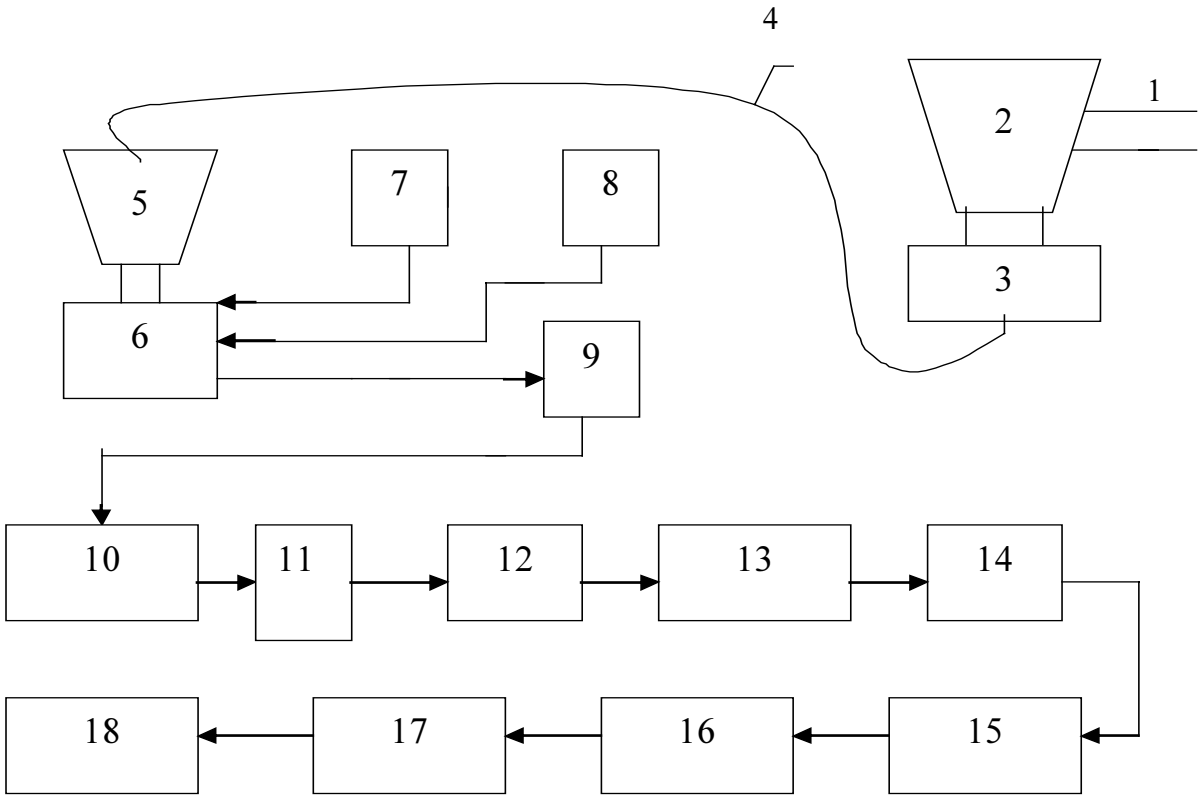
Якість хліба безумовно залежить від цих п'яти стадій і якщо хоч в одній із них порушити технологію, то хліб одержимо дуже поганої якості. Далі більш детально розглянемо перший і другий етапи технологічного процесу приготування хліба.

Ділянка підготовки сировини достатньо непромеханізована і автоматизована. Розроблені мироприємства по заміні аерозольної установки, яка транспортує борошно до вагів на шнекову, що дозволить зробити лінію більш гнучкою.

Сіль додають в опару в вигляді розчину, концентрацією 23 – 29 % по масі. Автоматичний регулятор концентрації розчину відсутній. Для контролю концентрації розчину, яка повинна бути постійною, періодично перевіряють його густину аерометром.. Коливання в густині (концентрації) розчину солі визивають порушення рецептурного складу солі у виробі, які можуть вплинути також на смак хліба, окрас скоринки, пористість.

Технологічна схема виробництва подового хліба із пшеничного борошна приведена на рис.1.

© Ю.О. Єрмолаєв, О.В. Сидоренко, М.О. Окольчишен. 2004



1 - пневмотранспортер; 2 - бункер накопичувач; 3 - забірний бункер; 4 - аерозольна установка подачі борошна; 5 - дозуючі ваги; 6 - заварочна машина; 7 - дозуюча машина (холодної і гарячої води); 8 - бачок для розчину солі; 9 - насос; 10 - бак для бродіння; 11 - насос; 12 - напорний бачок; 13 - тістозамішуюча машина; 14 - корито для бродіння тіста; 15 - тістоподілювач; 16 - укладчик тістових заготовок; 17 - шафа кінцевої розстойки; 18 - піч.

Рисунок 1 – Технологічна схема виробництва подового хліба із пшеничного борошна

Ділянка підготовки сировини достатньо непромеханізована і автоматизована. Розроблені міроприємства по заміні аерозольної установки, яка транспортує борошно до вагів на шнекову, що дозволить зробити лінію більш гнучкою.

Сіль додають в опару в вигляді розчину, концентрацією 23-29 % по масі. Автоматичний регулятор концентрації розчину відсутній. Для контролю концентрації розчину, яка повинна бути постійною, періодично перевіряють його густину аерометром.. Коливання в густині (концентрації) розчину солі визивають порушення рецептурного складу солі у виробі, які можуть вплинути також на смак хліба, окрас скоринки, пористість.

Приготування рідкої опари – готують рідкі опари із пшеничного борошна першого сорту на пресованих дріжджах. Для виробництва хліба високої якості необхідно, щоб якомога більша кількість борошна була зброджена у першій фазі. Максимально можливий вміст борошна у рідкій опарі. При вологості опари 65% у ній міститься біля 40% всього борошна, а при вологості 75% - лише біля 30%. Оптимальною є вологість опари біля 70%. При зниженні вологості до 65% підвищується в’язкість опари, що утруднює її транспортування трубопроводами.

У разі приготування опари на суміші пресованих дріжджів їх додають - за рецептурою. Допускається зменшення кількості пресованих дріжджів на 30 – 50 %. Такі опари дозрівають 3,5 – 4 години.

Розпізнають “великі” та “малі” опари. На ВАТ “Кіровоградському хлібозаводі” застосовують великі опари.

Рідкі опари готують періодичним (порційним) способом. При періодичному способі для приготування рідких опар використовують машини ХЗ – 2М – 200.

Схема приготування великої рідкої опари приведена на рис.2.

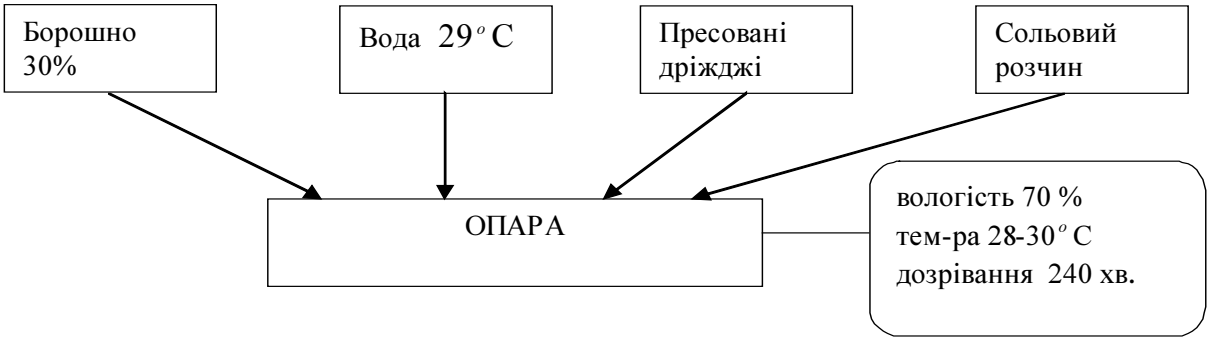


Рисунок. 2 - Схема приготування рідкої опари

В технологічному циклі (рис. 2) тільки для температурної стабілізації води застосовується релейний 2-х позиційний регулятор.

У машину дозують нагріту воду, пресовані дріжджі, сольовий розчин і борошно все це замішують.

При оцінці сили борошна за структурно-механічними властивостями тіста визначають його пружність, пластичність, в'язкість і еластичність.

Рисунок 3 – Осцилограма фариографа замішування тіста

Для визначення структурно-механічних властивостей тіста застосовують такі прилади, як фариограф, валориграф, пенетрометри, пластометр, реотест, екстенсометр тощо.

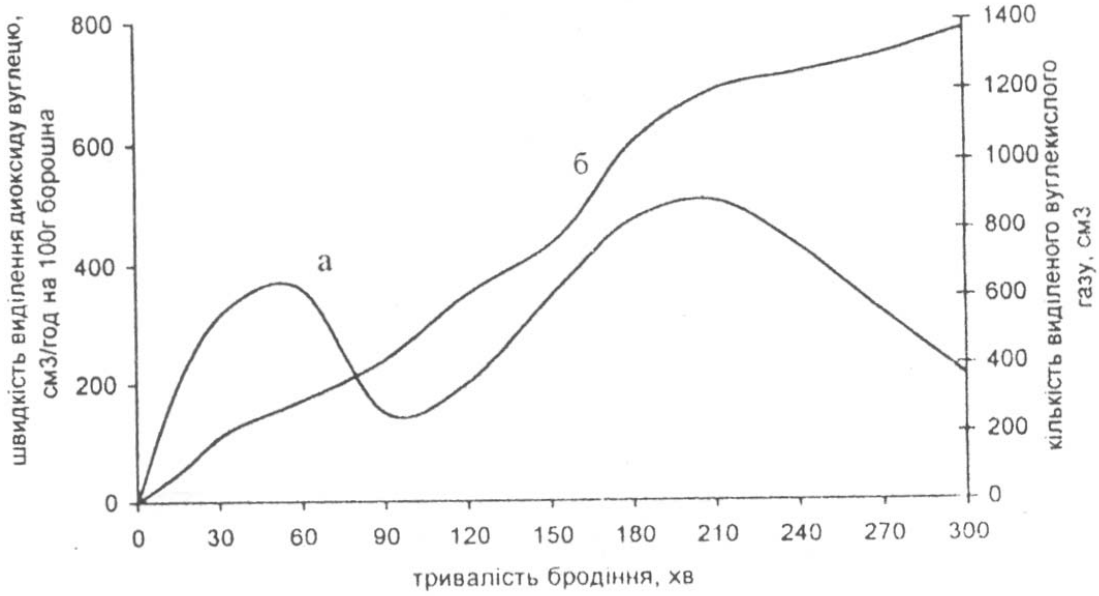
Фариограма (рис.3) характеризує такі властивості тіста:

- консистенцію, максимальне значення її на фариограмі позначено розміром "**a**". На рисунку видно, що консистенція збільшується на початку замішування до певного максимуму, деякий час залишається незмінною, після чого поступово знижується. У дослідженнях сили борошна рекомендується випробувати вести при постійному ззначенні максимуму консистенції тіста, що позначений на сітці фариограми цифрою 500. [1]

Чим сильніше борошно, тим більші на фариограмі значення **a, b, c, d** і тим менше значення **e**.

Великий інтерес визиває автоматизація контролю цукроутворювальної здатності борошна.

Пшеничне борошно вищого і першого сортів нормальної якості має цукроутворюючу здатність 275 – 300 мг мальтози на 10 г борошна. Цукроутворююча здатність менша за 180 – 200 мг мальтози на 10 г борошна, вважається низькою. В[2] приведена динаміка газоутворювальної здатності борошна (рис.4)



а) динаміка газоутворення; б) сумарне газоутворення за 5 годин бродіння тіста.

Рисунок 4 – Динаміка газоутворювальної здатності борошна пшеничного першого сорту

Таким чином, газоутворювальна здатність пшеничного борошна залежить від вмісту власних цукрів, але в більшій мірі обумовлена його цукроутворювальною здатністю. Саме накопичення цукрів під час бродіння тіста, вистоювання тістових заготовок, випікання обумовлює достатнє газоутворення на всіх стадіях приготування тіста і в перший період випікання, а також реакцію меланоїдиноутворення, що забезпечує необхідне забарвлення скоринки хліба.

Механізм утворення тіста й роль різних процесів при цьому наочно ілюструють фаринограми замішування пшеничного тіста (рис.5). Як видно з фаринограми через 1 – 2 хв після замішування крива досягає певного максимуму. Це характеризує перехід змішаної сировини у стан зв’язаної маси.

Аналіз фаринограми замішування житнього тіста свідчить про те, що порівняно з пшеничним воно значно швидше утворюється, має нижчу пружність меншу стабільність, швидше розріджується.

При двофазному способі приготування тіста дріжджові клітини адаптуються до борошняного середовища в першій фазі (опарі), і в другій фазі (тісті) бродіння відбувається рівномірно (рис.6).

Для пшеничного тіста характерним є значення pH від 5,0 до 6,0. Цей інтервал pH є оптимальним для життєдіяльності хлібопекарських дріжджів, що позитивно впливає на інтенсивність бродіння тіста.

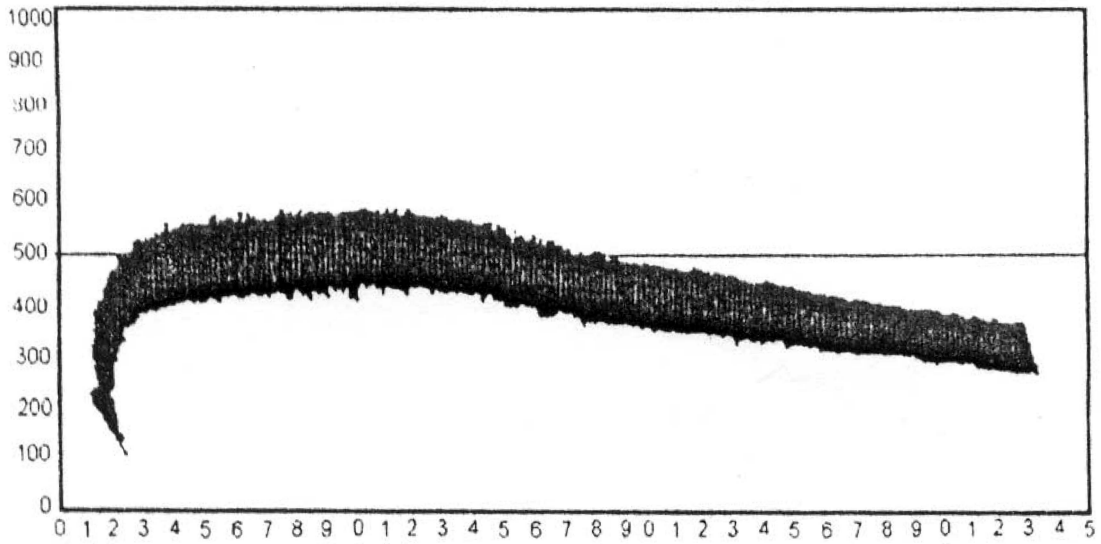


Рисунок 5 – Осцилограма фаринографа пшеничного тіста

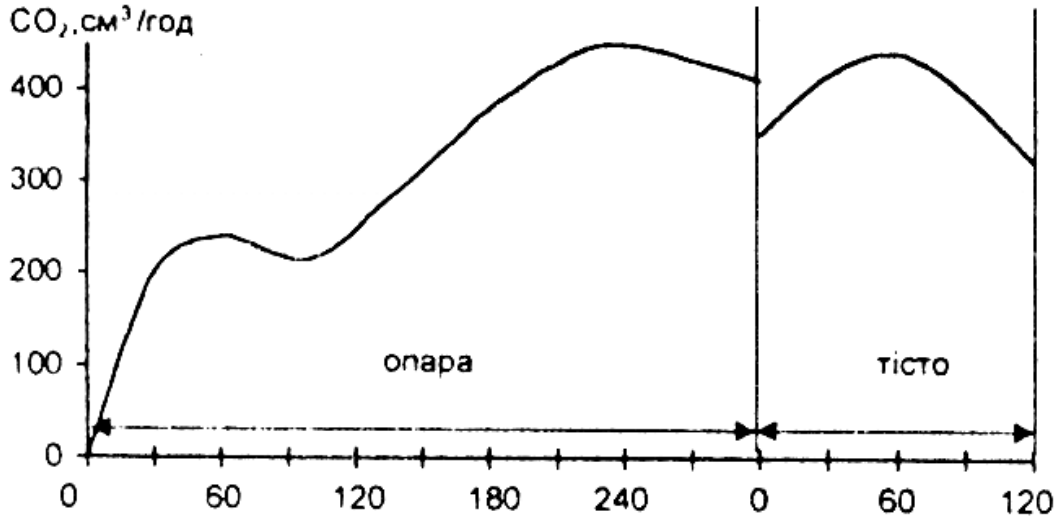


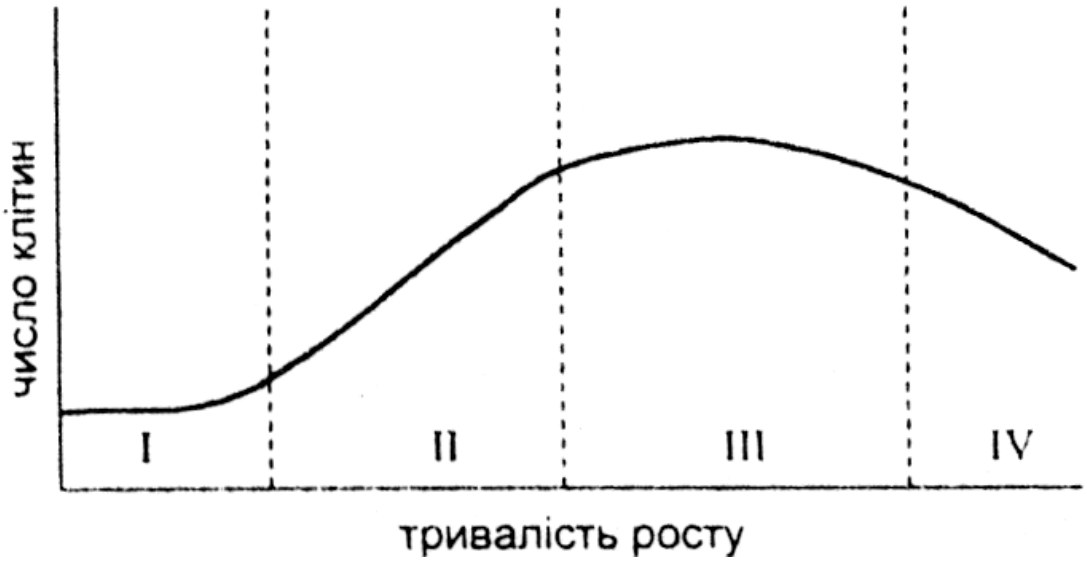
Рисунок 6 – Діаграма інтенсивності газоутворення при бродінні опари і тіста

Найбільше на інтенсивність бродіння впливає температура. При підвищенні температури тіста з 25 до $35^{o}C$ інтенсивність бродіння зростає майже вдвічі, при $35^{o}C$ спостерігається максимальна інтенсивність бродіння. При 45 - $50^{o}C$ життєдіяльність дріжджів затухає.

Сіль у кількості передбаченій рецептурою (1,3 – 2,0 %), дещо пригнічує процес зброджування цукрів дріжджами.

На активність бродіння впливає також концентрація цукрів в рідкій фазі тіста. Оптимальною концентрацією цукру, коли бродіння протікає найбільш інтенсивно є 2,5 – 3 %. Крива розмноження дріжджів у тісті приведена на рис.6.

Зараз контроль за цим складним технологічним процесом (особливо в другій стадії) здійснюється оператором. Від його уважності, реакції, досвіду, інтуіції залежить випрацювання регулюючих дій, які визначають якість хліба.



I – період адаптації;

II – період росту;

III – період зрілості;

IV – період відмирання.

Рисунок 7 – Крива розмноження дріжджів у тісті

Операції циклічної дії, включення приводів механізмів, подача води, борошна і т. д. виконується вручну і часто без наявності індикації.

На наступному етапі автоматизації розробляється мікропроцесорна система для контроля і регулювання параметрів цього технологічного процесу.

Список літератури.

1. Дробот В.І. Технологія хлібопекарського виробництва. – К.: Логос, 2002. – 365с.
2. Дробот В.І. Довідник з технології хлібопекарського виробництва. – К.: ТОВ “Руслана”,1998. – 413 с.

УДК 621.891

А.Д. Саинсус, генеральный директор
Кировоградская ВАТ «Красная Звезда»
М.И. Черновол, акад, проф., д-р. техн. наук, В.Н. Кропивный, доц., канд. техн. наук, Б.Е. Надворный, доц., канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет

Повышение абразивной износостойкости стрельчатых культиваторных лап дифференцированной индукционной наплавкой

Рассмотрена технология упрочнения культиваторных стрельчатых лап дифференцированной индукционной наплавкой сплавами с различной износостойкостью в условиях абразивного износа.
наплавка, сплав, абразивная износостойкость, стрельчатые культиваторные лапы

Культиваторы являются одним из распространенных видов почвообрабатывающих машин. Межремонтный период этих машин в первую очередь определяется интенсивностью износа рабочих органов - стрельчатых лап. Наплавка износостойкими сплавами режущих кромок лап культиваторов обеспечивает повышение их стойкости и самозатачивание в процессе работы. Действующий нормативный документ ОСТ 23.2.164-87 «Лапы и стойки культиваторов» предусматривает наплавку износостойкого слоя толщиной 0,4 мм при его неизменном составе по длине режущей кромки. В тоже время в процессе рыхления почвы происходит неравномерный износ элементов стрельчатой лапы. Износ носка в несколько раз превышает износ крыльев стрельчатой лапы. Ранее, в работе [1] теоретически установлено снижение силы давления почвы на режущую кромку лапы от носка к концу крыльев по линейному закону. В работе [2] экспериментально определено изменение удельного давления почвы по мере удаления от носка почвообрабатывающего рабочего органа в пределах от 0,425 МПа до 0,025 МПа. Исходя из тягового усилия удельное давление на поверхность лапы достигает ~ 0,15 МПа [3].

Целью данной работы является изучение возможности повышения стойкости стрельчатых лап и экономических показателей упрочнения при наплавке за счет дифференциации химического состава и строения композиционного керамико-металлического наплавленного слоя вдоль длины режущей кромки. В этой связи проводились исследования по определению влияния на износостойкость наплавленного слоя его состава и удельного давления абразивной среды. В многочисленных работах по изучению абразивного изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин установлены факторы, определяющие интенсивность износа [4-6]. Среди них выделяется, как основной, соотношение твердости абразивных частиц и структурных составляющих наплавленного слоя. Существенное влияние на степень износа оказывают и размеры структурных составляющих наплавленного слоя, прочность когезионной связи частиц наполнителей (керамики) и металлической матрицы. В тоже время отсутствуют системные исследования влияния удельных давлений со стороны абразивной среды на износостойкость композиционных керамико-металлических наплавок.

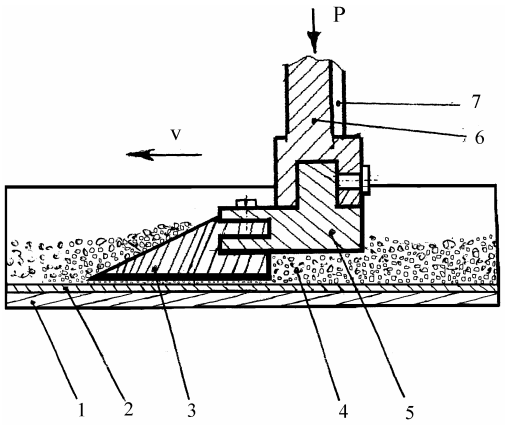
© А.Д. Саинсус, М.И. Черновол, В.Н. Кропивный, Б.Е. Надворный. 2004

Нанесение износостойких покрытий на образцы и культиваторные лапы, изготовленные из стали 65 Г, проводили наплавкой токами высокой частоты в условиях ВАТ «Красная звезда» (г.Кировоград) на установке ВЧГ-2-100/0,066 по базовому режиму: ток индикатора - 0,8 А; ток анода – 7,5…8,0 мА; накал - 12 А, мощность – 10кВт. Подготовку поверхности образцов под наплавку производили фрезерованием до достижения шероховатости R_z 40.

Перед наплавкой шихту равномерно распределяли по упрочняемой поверхности слоем толщиной 2,0-2,3 мм с последующим уплотнением деревянной линейкой.

Лабораторные испытания наплавленных образцов на износостойкость проводили на машине типа НК (неподвижное кольцо) [4]. Абразивной средой служил увлажненный кварцевый песок фракции 0,2…1,0 мм. Для испытаний использовали образцы из стали 65 Г (рис.1) с наплавленным на нижнюю поверхность слоем толщиной 0,4 – 0,6 мм. Образцы имели угол наклона передней поверхности 30^0, что имитировало условия работы стрельчатой лапы на участке режущей кромки с наплавленным нижним износостойким слоем. Образцы с наплавленными слоями разного состава закреплялись в гнездах штоков коромысла испытательной машины НК.

Испытания образцов проводились при скорости скольжения 0,56 м/с, при дискретных значениях удельных давлений на наплавленную поверхность 0,020; 0,085 и 0,150МПа. Абсолютный износ образцов определяли взвешиванием через каждые 0,5 часов испытаний в течении всего цикла (3 часа).



1 – дно чаши; 2 – медное кольцо; 3 – образец с наплавленным покрытием; 4 – абразивная среда; 5 – зажим для образца; 6 – шток; 7 – паз штока.

Рисунок 1 – Схема испытаний образцов на абразивный износ

В производственных условиях ВАТ «Красная звезда» для наплавки серийных стрельчатых лап культиваторов использовалась смесь ПС-14-60, состоящая из 60% углеродистого феррохрома марки ФХ-800 фракции 150-200 мкм и сплава (связки) ЛГС-1 следующего состава, %: 0,9…1,5 C; 0,3…0,7 B; 2,8…5,0 Si; 2,0 Cr; 2,0…4,0 Mn; 2,0…4,0 Ni; 1,5…2,5 Cu.

В качестве флюсующих материалов к смеси добавляли буру техническую, борную кислоту и силикокальций. При исследовании микроструктуры износостойкого слоя, наплавленного по заводской технологии, по всему сечению наблюдаются крупные карбиды, которые в процессе нагрева под влиянием термических напряжений растрескиваются, образовывая транскристаллитные трещины. Микротвердость карбидов составляет H_μ = 1426…3580 кгс/мм^2. Матрица представляет собой хромистую эвтектику с микротвердостью H_μ =510…794 кгс/мм^2 с мелкими карбидами

различной формы. Наплавленный слой по существующей технологии не может обеспечить высокую износостойкость, так как нарушение сплошности карбидной фазы приводит к ее интенсивному выкрашиванию, а образующаяся матрица имеет недостаточно высокую прочность. На отдельных участках отсутствует надежная адгезионная связь между поверхностью карбидов и матрицей.

В практике индукционной наплавки рабочих органов почвообрабатывающей техники в качестве связки для формирования износостойких покрытий используются высокохромистые железо-углеродистые сплавы (сормайты). Они технологичны, обладают высокой абразивной износостойкостью, производится их промышленный выпуск. В процессе проведения исследований в качестве основы шихты использовали порошок ПГ-УС-25 (У50Х40Н2С2Г) следующего состава, %: 4,5…5,5 C; 1,8…2,8 Si; 2,5 Mn; 38…42 Cr; 1,0…1,8 Ni. Размер фракций – 150…200 мкм. Согласно технических условий данный сплав обеспечивает твердость наплавленного слоя HRC 52…56.

Выбор керамического наполнителя для введения в состав износостойкого покрытия основывался на требованиях высокой твердости, прочности, эффективного смачивания его расплавом связки [6]. Важную роль также играет близость значений плотности матрицы и керамического наполнителя.Практикой индукционной наплавки установлено, что наиболее высокие результаты достигаются при использовании в качестве наполнителя карбидов бора, хрома и вольфрама.

В качестве наполнителей композиционных покрытий в ходе проведения предварительных экспериментов использовали порошки следующего химического состава и фракций:

1. КХНП – 20 (ТУ 48-19-381-85). Массовый состав: 80% карбиды хрома Cr_3C_2 плакированные Ni = 20%. Размер фракций 150 – 200 мкм.

2. ВНП – 15 (ТУ 87-ГССР01-87). Массовый состав: карбиды вольфрама WC = 85%, плакированные 15% Ni. Размер фракций – 50 мкм.

3. Порошок высокоуглеродистого феррохрома ФХ800. Массовый состав, %: 7,88 C ; 71,25 Cr ; 0,24 Si ; 20,55 Fe ; 0,044 S ; 0,022 P . Размер фракций 150-200, 300-350 и 400-600 мкм.

4. Карбиды хрома Cr_3C_2 – содержание углерода составляет 13,33%. Размер фракций 30 – 40 мкм.

5. Порошок твердого сплава ВК6 – в состав которого входят 94% карбидов вольфрама WC , порошок металлического кобальта Co (6%). Размер фракции 50 мкм.

6. Карбид бора B_4C. Размер фракций 60-80 мкм и 120 мкм.

Предварительные опыты показали, что карбиды вольфрама и карбиды хрома (Cr_3C_2) в процессе наплавки интенсивно растворяются в жидкой матрице, образуя зачастую покрытия из полностью проплавленной шихты, а не композиционные слои. Карбиды вольфрама сосредотачиваются, в силу большой плотности, на дне сварочной ванны, что затрудняет получение равномерной структуры по толщине слоя покрытия. По этой причине в дальнейших исследованиях карбиды вольфрама и порошок твердого сплава ВК6 в состав композиционных покрытий не вводили. При использовании в качестве наполнителя измельченного феррохрома ФХ800 в микроструктуре всех образцов присутствовали карбиды в строении которых наблюдалось значительное количество трещин и дефектов, приводящих к интенсивному выкрашиванию керамического наполнителя при контакте с частицами абразива (рис.2).

Рисунок 2 – Микроструктура наплавленного слоя состава ПГ-УС-25+20% ФХ800, х 100

Для снижения скорости растворения карбидов хрома в матрице в состав покрытия при дальнейших исследованиях вводили только плакирование никелем порошки карбида хрома марки КХНП-20. Металлографическое исследование микроструктуры износостойких слоев, полученных из смеси порошков ПГ-УС-25 и 10-30% КХНП-20, показало их прочную связь с металлической основой, без пор, раковин и несплошностей. Наплавленные слои имеет однородное строение с пористостью на превышающей 3%. Основу покрытия образует эвтектика, представляющая собой смесь твердого раствора хрома и никеля в железе и легированных карбидов (рис.3). Микротвердость эвтектики при увеличении содержания добавки КХНП-20 возрастает от 613 до761 кгс/мм^2. Эвтектика плотно окружает крупные плотные карбиды хрома с заокругленными углами (H_μ = 1891 -2010 кгс/мм^2). При повышении в составе шихты количества КХНП-20 свыше 30% в микроструктуре отмечается контактирование между собой отдельных включений карбидов хрома без прослойки связки, что ослабляет прочность их закрепления в матрице.

Рисунок 3 – Микроструктура наплавленного слоя состава ПГ-УС-25 + 30% КХНП-20, х300

Одним из путей эффективного повышения ресурса деталей машин, работающих в условиях абразивного износа, является использование в качестве наполнителя композиционных покрытий карбида бора (B_4C). Это обусловлено повышенной твердостью боридов, по сравнению с частицами абразивной среды. Исследовали индукционную наплавку образцов смесью состоящей из порошка ПГ-УС-25 и 2…20% по массе (5…50% по объему) карбида бора.

В процессе формирования износостойких наплавок с добавками B_4C при нагреве ТВЧ образование жидкой фазы начиналось от поверхности культиваторной лапы. При дальнейшем нагреве проплавление смеси увеличивалось и происходило соединение отдельных капель, а также растворение карбидов бора в матричном материале. При содержании в смеси более 8% B_4C, в результате малой плотности частиц карбидов бора, они вместе с флюсом всплывают к поверхности наплавки и образуют пористый слой со шлаковыми включениями. При введении в шихту карбидов бора в виде фракции 60…80 мкм в количестве до 20% по массе в процессе формирования жидкой ванны происходит их полное растворение с последующим формированием тонкоразветвленной эвтектики. Микротвердость эвтектики, состоящей из боридов различного состава и матричного материала по мере увеличения содержания B_4C в смеси от 2 до 20% возрастает от 804 кгс/мм^2 до 1287 кгс/мм^2.

При использовании в качестве наполнителя 6…8% карбидов бора в виде фракции 150 – 200 мкм образуются качественные наплавленные слои в микроструктуре которых наблюдаются значительное количество карбидов вытянутой, прямоугольной, ромбической и искаженной кубической формы (рис.4). При этом микротвердость карбидной фазы составляет H_μ = 1680 – 1782 кгс/мм^2, эвтектики H_μ = 1352 кгс/мм^2, что отвечает требованиям высокой абразивной износостойкости наплавки. Агрегатная твердость износостойкого слоя, наплавленного по заводской технологии, составляла HRC 44…48; наплавленных смесью порошков ПГ-УС-25 +10% КХНП –HRC 50…52; ПГ-УС-25 +30% КХНП – HRC 54…56; наплавленных смесью порошков ПГ-УС - 25 + 6% B_4C фракции 150…200 мкм – HRC - 56…58.

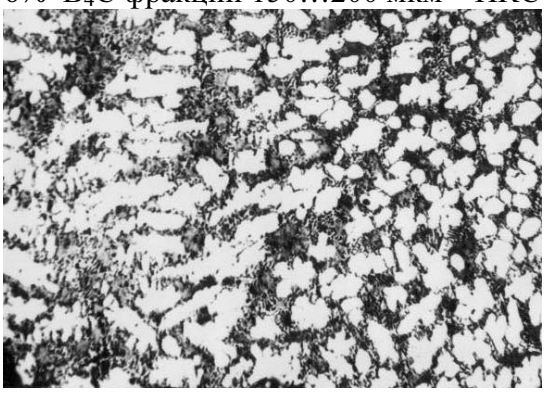
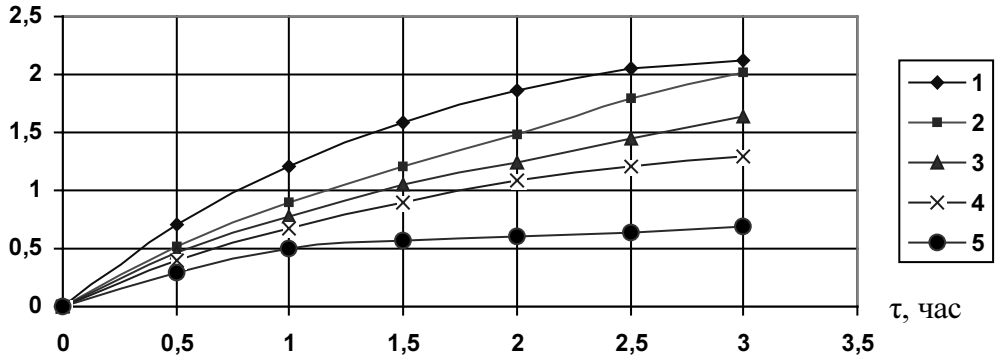


Рисунок 4 – Микроструктура наплавленного слоя состава ПГ-УС-25+6% карбидов бора (фракция 150 – 200 мкм), х300

Исследование динамики абразивного износа наплавленных слоев проведенное при удельных давлениях 0,02; 0,085 и 0,15 МПа показали, что на кривых износа выделяется два характерных периода. Первый период испытаний продолжительностью до 30 мин характеризуется повышенной потерей веса образцов, что связано с выкрашиванием выступающих карбидов и истиранием неровностей на поверхности трения. Это особенно характерно для испытаний наплавок с карбидом бора, что связано с частичным всплыванием включений наполнителя на поверхность образцов в процессе расплавления шихты. Второй период характеризует процесс стабильного изнашивания при трении поверхности образцов с абразивной средой. Динамика

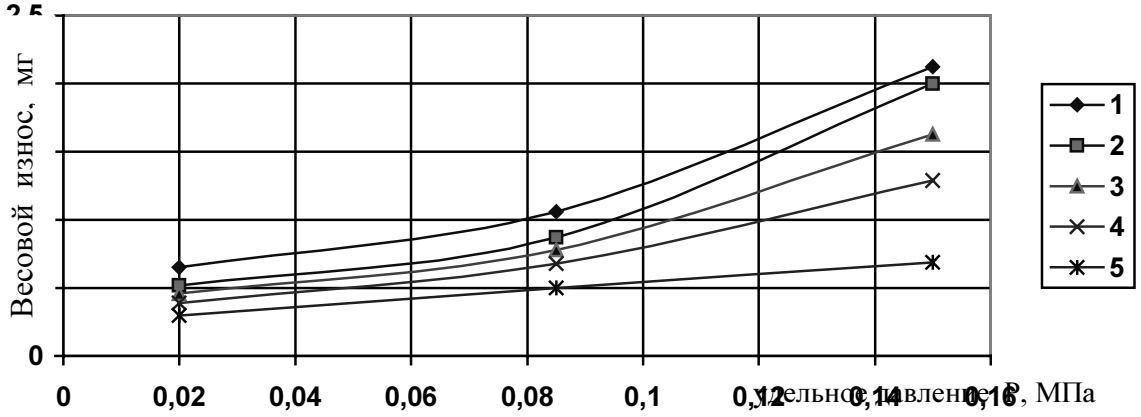
изнашивания в этот период носит характер близкий к линейному характеру. Наиболее интенсивно изнашивается слой, образованный при наплавке сплавы ПГ-УС-25, наиболее высокая износостойкость у наплавки ПГ-УС-25 +6% B_4C (рис.5) Особенно существенно эта разница проявляется при повышении удельных давлений до 0,15 МПа. При такой нагрузке в покрытиях, изготовленных по базовой технологии, происходит выкрашивание карбидов хрома, имеющих значительное количество сколов и трещин. По этой причине износостойкость связки ПГ-УС-25 при удельном давлении 0,15 МПа близка к износостойкости серийной наплавки из сплава ПС-14-60.

Полученные зависимости абразивного износа композитных наплавок от удельного давления при трении (рис.6) позволяют за счет подбора соответствующих составов достигать равномерного износа по всей поверхности режущих лезвий. Так, наплавка составом ПГ-УС-25 + 30% КХНП при удельных давлениях менее 0,1 МПа имеет износостойкость близкую, к износостойкости наплавки состава ПГ-УС-25 + 6% B_4C при Р = 0,15 МПа.



Наплавленные образцы: 1) ПГ-УС-25; 2) ПС-14-60; 2) 3)ПГ-УС-25 + 15% КХНП-20; 4)ПГ-УС-25 + 30% КХНП-20; 5)ПГ-УС-25 + 6% B_4C.

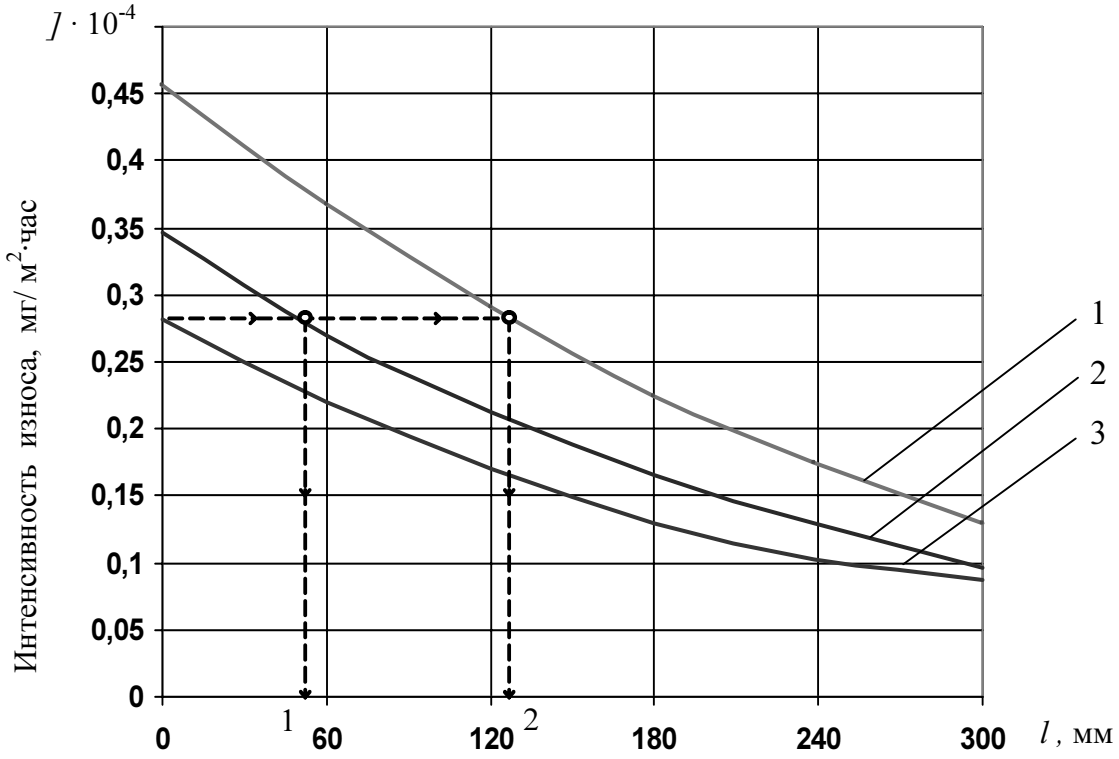
Рисунок 5 – Динамика абразивного изнашивания при испытаниях на машине типа НК наплавленных образцов при удельном давлении Р=0,15 МПа



Наплавленные образцы: 1) ПГ-УС-25; 2)ПС-14-60; 3)ПГ-УС-25 + 15% КХНП-20; 4) ПГ-УС-25 +30% КХНП-20; 5) ПГ-УС-25+6% B_4C

Рисунок 6 – Зависимость весового износа образцов от удельного давления при испытании на абразивное изнашивание (время испытания – 3 часа)

На основе полученных зависимостей, учитывая линейный характер снижения удельных давлений от носка (Р ~ 0,150 МПа) к окончанию крыла (Р = 0,02 МПа) культиваторной лапы, построена номограмма, позволяющая определять рациональное содержание наполнителя КХНП-20 в шихте на основе порошка ПГ-УС-25 по длине режущего лезвия (рис.7). Выбрав в качестве шихты для индукционной наплавки носка культиваторной лапы состав ПГ-УС-25+30% КХНП-20 на участке от начала режущего лезвия до точки 1 будет обеспечиваться износ с интенсивностью не более 0,28 мг/час·м^2. Для обеспечения аналогичной износостойкости участок режущего лезвия 1-2 достаточно наплавить составом ПГ-УС-25+15% КХНП-20. Участок от точки 2 до окончания крыла стрельчатой культиваторной лапы будет иметь эквивалентную износостойкость при наплавке сплавом ПГ-УС-25 без добавок наполнителя. Между участками с наплавками различного состава выраженная граница раздела отсутствовала. Исходя из экономических предпосылок, учитывая высокую стоимость порошков карбида бора, а также менее выраженную зависимость износостойкости от удельного давления в контакте с абразивной средой этот наполнитель для дифференцированной наплавки участков культиваторных лап не использовали.



Состав наплавки:1)ПГ-УС-25; 2)ПГ-УС-25 + 15% КХНП-20; 3) ПГ-УС-25 +30% КХНП-20

Рисунок 7 – Номограмма для определения состава дифференцированного наплавленного слоя по длине режущей кромки стрельчатой культиваторной лапы

Стендовые сравнительные испытания серийных и экспериментальных наплавленных культиваторных лап производили на круговом стенде имитирующем работу рабочих органов в полевых условиях. В качестве абразивной среды использовали смесь состоящую из 85% глинистого песка фракции 0,315 мм и 15% гравия фракции 2-6 мм. Влажность смеси составляла 18-20%. Путь трения составлял

3,8 м за оборот, что соответствует при частоте вращения 14 об/мин скорости движения 0,9 м/с. Весовой износ серийных культиваторных лап Н043.05.402 после испытаний составил 0,0170 кг, тогда как износ экспериментальных лап не превышал 0,0122 кг. Линейный износ носка экспериментальной лапы составил 47 мм (у серийной 64 мм). Средний износ по ширине крыла у лапы с дифференцированной наплавкой составил 18 мм, у серийной - 21 мм.

Предложенная технология упрочнения культиваторных стрельчатых лап индукционной наплавкой сплавами с различной износостойкостью в условиях абразивного износа позволяет повысить стойкость рабочих органов в 1,3 …1,4 раза при экономии дорогостоящих порошков наполнителей композитных наплавок.

Список литературы

1. Саинсус А.Д. Динамика износа стрельчатых лап культиватора //Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Вип.33, Кіровоград,2003,с.281-285.
2. Саінсус О.Д., Сало В.М. Експериментальне визначення динаміки зміни тягового опору культиваторних лап від наробітку//Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.Вип.34,Кіровоград,2004,с.8-12
3. Маяускас И.С. Исследование распределения давления по поверхности лемеха при пахоте /Тракторы и сельхозмашины, №11,1958.
4. Добровольский А.Г., Кошеленко П.И. Справочник. Абразивная износостойкость материалов. – Киев.: Техника. 1989. – 128 с.
5. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
6. Черновол М.И. Упрочнение и восстановление деталей машин композиционными покрытиями. -К.: Вища школа, 1992.-79 с.

УДК 621.74

В.Н. Ломакин, В.Н.Кропивный, доценты, канд. техн. наук
Кировоградский национальный технический университет
М.С. Горюк, канд. техн. наук
Физико-технологический институт металлов и сплавов (г. Киев)

Использование численного моделирования для описания процесса затвердевания чугунного шара

Рассматривается применение метода математического моделирования для определения времени начала и окончания затвердевания легированных чугунов в зависимости от химического состава сплава и для прогнозирования соотношения между количеством ледебурита, определяющего износостойкость шара, и количеством аустенито-графитной эвтектики.
расплав, кокиль, легированный чугун, шар, затвердевание, моделирование

Расчет и оптимизация свойств кокильных отливок невозможны без адекватного моделирования температурных полей в системе отливка – литейная форма. Скорость охлаждения чугунных мелющих тел оказывает на их структуру такое же большое влияние, как и химический состав металла, поэтому получение отливок шаров с заданной структурой возможно только при оптимальном сочетании этих двух важнейших факторов.

Для исследования процесса затвердевания и охлаждения отливки шара в кокиле математическая модель должна учитывать ряд особенностей, как общих, характеризующих такой процесс в целом, так и специфических, присущих лишь к технологии кокильного литья. К первым из них следует отнести влияние переходной двухфазной зоны, образующейся в интервале температур кристаллизации, и химического состава сплава на процесс затвердевания отливки. Ко вторым – термическое сопротивление слоя теплоизоляционного покрытия, наносимого на рабочую поверхность кокиля, и конструкцию литейной формы [1].

При разработке математической модели была использована универсальная разностная схема без явного выделения в отливке границы раздела фаз. Основную роль при использовании такой схемы играет принцип “размазывания“ или “сглаживания“ теплоемкости по температуре. Как известно, при температуре фазового перехода $T=T_{кр}$ энергия тепловой системы W, как функция температуры, испытывает скачок величиной L. Эта величина есть энтальпия (теплота) фазового перехода, т.е.

$$W = \int_0^T c(T)dT + L \cdot \eta\left(T - T_{кр}\right), \qquad (1)$$

где $c(T)$ – теплоемкость, как функция температуры.
$\eta(T\text{-}T_{кр})$ – функция температуры.

Здесь, очевидно, функция $\eta(T\text{-}T_{кр})$ терпит разрыв при $T=T_{кр}$:

$$\eta(\Delta T) = \begin{cases} 1, \Delta T \geq 0; \\ 0, \Delta T < 0, \end{cases} \qquad (2)$$

где $\Delta T=T\text{-}T_{кр}$.

© В.Н. Ломакин, В.Н.Кропивный, М.С. Горюк. 2004

Тогда, учитывая что $\frac{\partial\eta(\Delta T)}{\partial(\Delta T)}=\delta(\Delta T)$ – дельта-функция Дирака, уравнение теплопроводности принимает вид

$$\rho\left[c(T)+L\cdot\delta(\Delta T)\right]\frac{\partial T}{\partial\tau}=\lambda\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right]; \tag{3}$$

где ρ – плотность расплава, кг/м^3;

τ – время, с;

λ – коэффициент теплопроводности сплава, Вт/м·К;

r – радиус-вектор, м.

Для перехода к разностной схеме, реализуемой численным методом конечных разностей, заменим функцию Дирака $\delta(T\text{-}T_{кр})$ приближенной дельтаобразной, или "размазанной" δ-функцией: $\delta(T\text{-}T_{кр},\ \Delta)\geq 0$, где Δ – величина полуинтервала температурного интервала 2Δ, на котором δ-функция отлична от нуля. Это "размазывание" эквивалентно замене на интервале $(T_{кр}\text{-}\Delta,\ T_{кр}+\Delta)$ разрывной функции $\eta(T\text{-}T_{кр})$ непрерывной функцией $\eta(T\text{-}T_{кр},\ 2\Delta)$ такой, что $\delta(\Delta T,\ \Delta)=\eta'(\Delta T)$. Тогда, приняв

$$\left.\begin{aligned} &T_{кр}=\frac{T_L+T_S}{2};\\ &2\Delta=T_L-T_S;\\ &\Delta\equiv T_L-T_{кр}=T_{кр}-T_S \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

можно с помощью сглаженной функции $\delta(T\text{-}T_{кр},\ \Delta)$ описать процесс затвердевания отливки шара в интервале температур ликвидус (T_L) – солидус (T_S). Функция $\delta(\Delta T,\ \Delta)$ в данной работе была подобрана следующим образом:

$$\delta\left(T-T_{кр},\Delta\right)=\begin{cases} 0;T>\left[\left(T_{кр}+\Delta\right)\equiv T_L\right];\\ \dfrac{1}{2\Delta}=\dfrac{1}{T_L-T_S}\equiv const,\ T_S<T<T_L;\\ 0;T<\left[\left(T_{кр}-\Delta\right)\equiv T_S\right]. \end{cases} \tag{5}$$

При этом $\delta(T\text{-}T_{кр},\ \Delta)$ также как и функция $\eta(\Delta T,\ 2\Delta)$ является непрерывной.

Таким образом, вводится сглаженная или эффективная теплоемкость $\bar{c}(T)$

$$\bar{c}(T)=c(T)+L\cdot\delta\left(T-T_{кр},\Delta\right). \tag{6}$$

Уравнение теплопроводности (3) при этом принимает следующий вид:

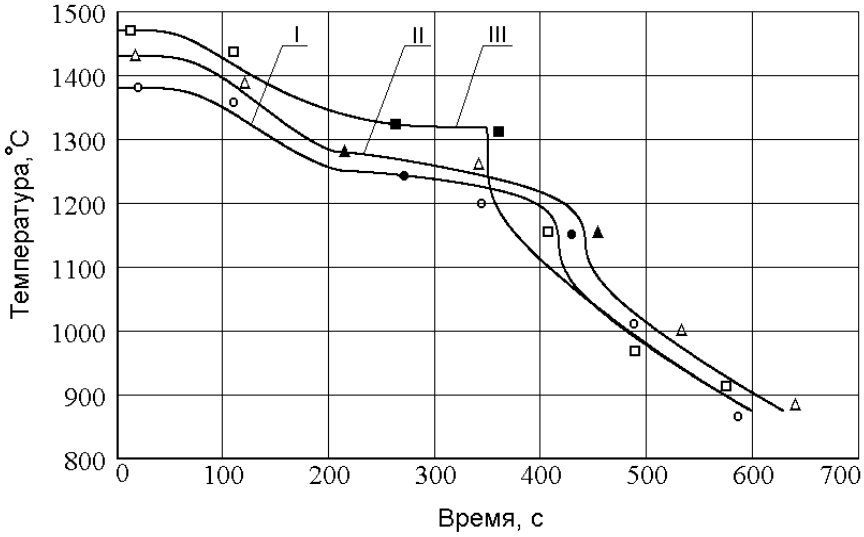
$$\rho\bar{c}(T)\frac{\partial T}{\partial\tau}=\lambda\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right], \tag{7}$$

где функцию спектральной теплоемкости для жидкой фазы можно заменить постоянной $c_{ж}$, а для твердой фазы – c_m, т.е.

$$\bar{c}(T)=\begin{cases} c_{ж}, T > T_L; \\ \dfrac{c_{ж}+c_m}{2}+\dfrac{L}{T_L-T_S},\ T_S < T < T_L; \\ c_m,\ T < T_S. \end{cases} \qquad (8)$$

В соответствии с формализованной постановкой задачи затвердевания уравнение (7), дополненное соответствующими начальным и граничным условиями, решали с помощью персонального компьютера типа IBM по специально разработанной программе. Для моделирования были выбраны три типа хромистых чугунов: I тип – Cr <1%, II тип – 1%<Cr<5%, III тип – Cr>20%.

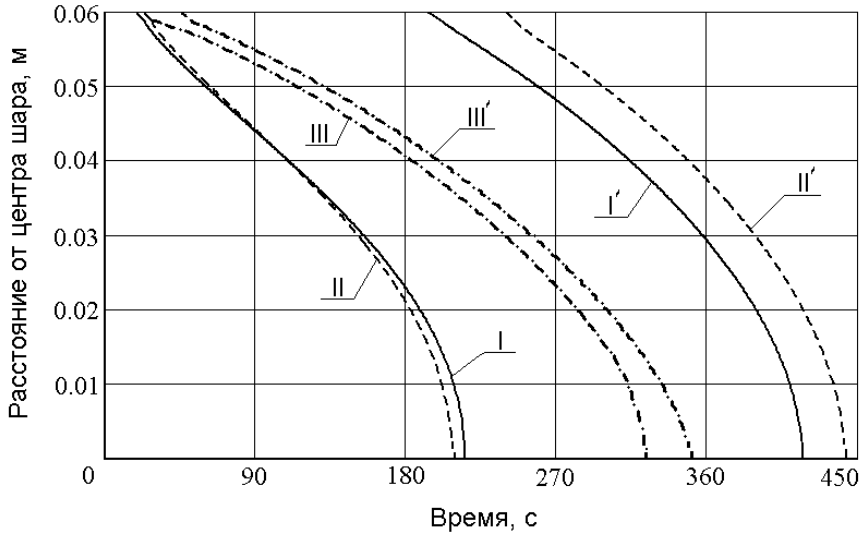
На рис. 1 представлены результаты численного и экспериментального исследований. На расчетных кривых охлаждения сферического изделия диаметром 120 мм отчетливо видны начало и окончание каждой из стадий процесса: 1) отвода теплоты перегрева, 2) затвердевания в интервале температур и 3) охлаждения. Высокохромистый сплав затвердевает в очень узком интервале температур, практически при постоянной температуре, поэтому на расчетной кривой его охлаждения наблюдается фаза стояния ликвидуса.



○, Δ, □ – эксперимент; ○ – при затвердевании и охлаждении отливки шара из сплава I-го типа (низкохромистого чугуна); Δ – то же для сплава II-го типа (среднехромистого чугуна); □ – сплав III типа, ВХБЧ; ●, ▲, ■ – начало и окончание процесса затвердевания соответствующих обозначениям сплавов

Рисунок 1 – Изменение температуры в центре шара ∅120 мм
(слой краски ε=0.5 мм и $\lambda_{покр}$=0.291 Вт/(м·°С)

Для определения характера затвердевания шара из хромистого чугуна, содержащего указанное выше количество хрома, рассчитана кинетика затвердевания отливки. Как видно из рис. 2, в полости диаметром 120 мм, в процессе затвердевания низкохромистого (или среднехромистого) чугуна сначала образуется двухфазная зона, которая увеличивается с течением временем. За первые 220 с фронт ликвидуса достигает центра отливки. При этом кристаллизующийся металл находится в переходном твердо-жидком состоянии по всему сечению отливки. Затем температура поверхности шара снижается до температуры солидуса и начинается затвердевание металла в направлении центра отливки. В данном случае имеет место промежуточный случай затвердевания, которому присущи особенности последовательной и объемной кристаллизации.

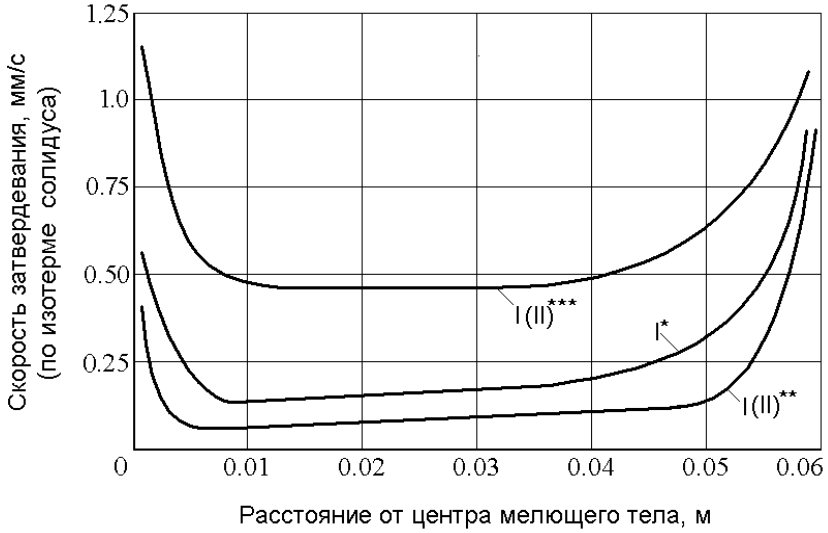


I, II, III – начало затвердевания сплавов; I′, II′, III′ – окончание затвердевания сплавов

Рисунок 2 – Кинетика затвердевания шара ∅120 мм
(ε=0.5 мм и $\lambda_{покр}$=0.291 Вт/(м·°С)

Шар из высокохромистого чугуна (ВХБЧ) затвердевает последовательно в узком температурном интервале. В процессе кристаллизации вдоль радиуса в отливке одновременно присутствуют три фазы: жидкая, переходная и твердая. При этом если твердая корка с течением времени увеличивается, то переходная двухфазная зона практически не изменяется в размерах, двигаясь перед нарастающей твердой фазой (рис. 2).

С целью прогнозирования структуры металла в шаре ∅120 мм из легированного чугуна рассчитывали распределение линейной скорости затвердевания по сечению отливки при различных значениях теплопроводности кокильной краски. На рис. 3 показано изменение скорости затвердевания различных хромистых чугунов вдоль радиуса отливки шара.



* – при использовании кокильных покрытий с коэффициентом теплопроводности, равным 0.32 Вт/(м·°С);
** – при использовании красок с невысоким коэффициентом теплопроводности, равным 0.175 Вт/(м·°С);
*** – при использовании кокильных покрытий с повышенным коэффициентом теплопроводности, равным 0.48 Вт/(м·°С)

Рисунок 3 – Распределение скорости затвердевания по сечению шара
(по изотерме солидуса; ε=0.5 мм)

Полученные данные указывают на неравномерность распределения линейной скорости затвердевания по сечению шара. В начале процесса фронт солидуса у поверхности шара имеет высокую скорость, которая стремительно уменьшается при увеличении толщины затвердевшей корки. Далее, с течением времени, толщина двухфазной зоны постепенно уменьшается и термическое сопротивление затвердевшего слоя уже не оказывает заметного влияния на отвод теплоты. Более важным фактором при уменьшении размеров жидкого ядра в центре отливки является увеличение удельной поверхности теплоотвода в твердую корку. Поэтому линейная скорость затвердевания в центральной зоне отливки возрастает.

В качестве сравнительной характеристики на рис. 4 показана расчетная зависимость скорости затвердевания от времени для шара диаметром 40 мм (по изотермам ликвидуса и солидуса, сплав I типа).

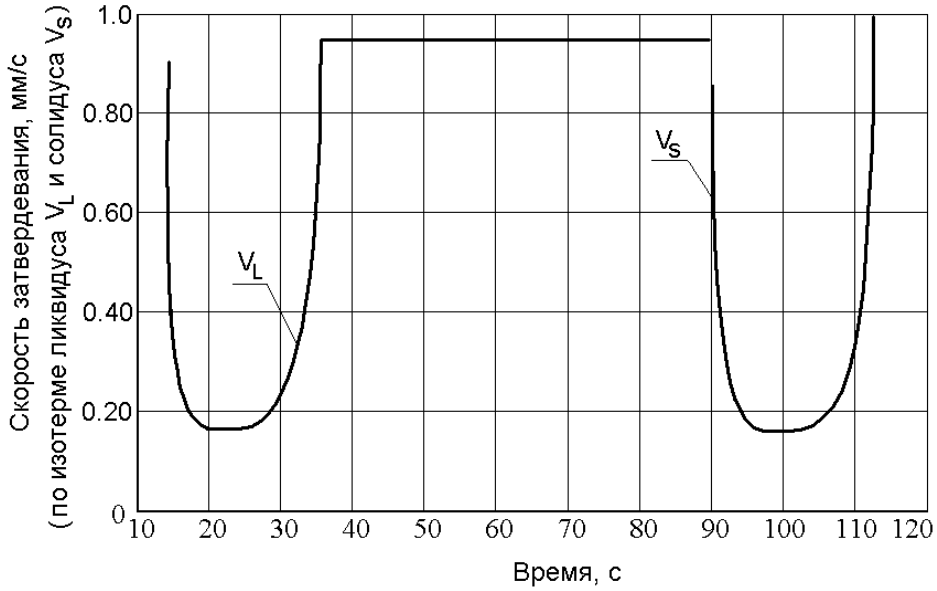


Рисунок 4 – Зависимость скорости затвердевания чугунного шара ∅40 мм от времени

В результате проведенных расчетов установили, что наиболее эффективный режим охлаждения чугунного шара диаметром 120 мм должен достигаться при использовании кокильных красок с коэффициентом теплопроводности ($\lambda_{покр}$) 0.24–0.38 Вт/(м·°С). В этом случае скорость затвердевания обеспечивает толщину отбеленного слоя ~22 мм, т.е. 0.37 радиуса отливки. Согласно диаграмме Г. Ф. Баландина – А. И. Вейника [2] прогнозируемая твердость отбеленной части в отливках из низколегированного чугуна находится в пределах от 400 до 520 НВ (~42–50 HRC), а перлито-графитной сердцевины – от 210 до 286 НВ с пределом прочности 250–320 МПа.

Данные, полученные расчетным путем, хорошо согласуются с результатами заводских испытаний литых мелющих тел, что позволило оптимизировать технологию изготовления таких изделий.

Список литературы

1. Дубоделов В. И., Погорский В. К., Кропивный В. Н., Ломакин В. Н. Численное исследование кинетики затвердевания мелющих тел в металлических формах с естественным воздушным охлаждением //Збірник наукових праць Кіровградського державного технічного університету. – 1999. – №4. – С. 5–10.
2. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования оливки. М.: Машиностроение, 1976, 328 с.

УДК 631.365

М.М. Петренко, проф., канд. техн. наук, І.О. Скриннік, асп.
Кіровоградський національний технічний університет

Зерносушильна установка касетного типу для сушки зернових культур

В даній статті виконаний розрахунок зерносушильної установки касетного типу та її будова. Виконаний графік сушіння насіння до сухого стану в залежності від товщини матеріалу, ваги та кута нахилу сит.

псевдозріджений шар насіння, зерносушильна установка касетного типу

В різних галузях промисловості для інтенсифікації технологічних процесів широко застосовуються методи прискорення тепло- і масообміну, основані на принципі киплячого шару зернистих матеріалів. Застосування киплячого шару для сушки зерна, як показав ряд досліджень[1,2,3] дозволяє значно прискорити процес його обезвожування .

Гідродинаміку „киплячого" шару представлено в процесах [1,2,3,4] наступним чином. По мірі збільшення швидкості потока сушильного агента крізь шар зернистого матеріалу, збільшується його гідравлічний опір. При цьому під'ємна сила настільки збільшується, що зникає тиск часток одна на іншу, в цьому стані шар зернистого матеріалу злегка розширюється і нагадує в'язку рідину, котра може переміщуватися по сітці, маючи невеликий нахил.

Гідравлічний опір по товщині шару приблизно змінюється по лінійному закону, як і для спокійного шару. При подальшому збільшенні швидкості сушильного агента дійсна швидкість (швидкість фільтрації) стає такою, при якій сила тиску на частки, визвана гідравлічним опором, стає більше сили тяжіння шару матеріалу. Шар зернистого матеріалу при цьому розширюється і частки утворюють бурний вихровий рух. Окремі частки вилітають з шару і мають траєкторію різного напряму, але до цього стану сушіння доводити не рекомендується.

Приклад розрахунку зерносушильної установки касетного типу (рис.1):

Довжина першої решітки визначається за формулою

$$L_1 = \frac{\sin\beta \cdot L}{\sin[[\pi - (\beta + \alpha_1)]]}, \tag{1}$$

де β – кут нахилу бокових сторін зерносушарки, рад, (рис.2)

α – кут нахилу сит, рад, (рис.2)

L– довжина половини сушарки, м, (рис. 2)

$$H_{\alpha 1} = \sin\alpha_1 \cdot L_1, \tag{2}$$

$$H_{o1} = H_{\alpha 1} + \Delta,$$

де $H_{\alpha 1}$ – висота від низу сушарки до верхньої точки нижнього сита, м, (рис. 2)

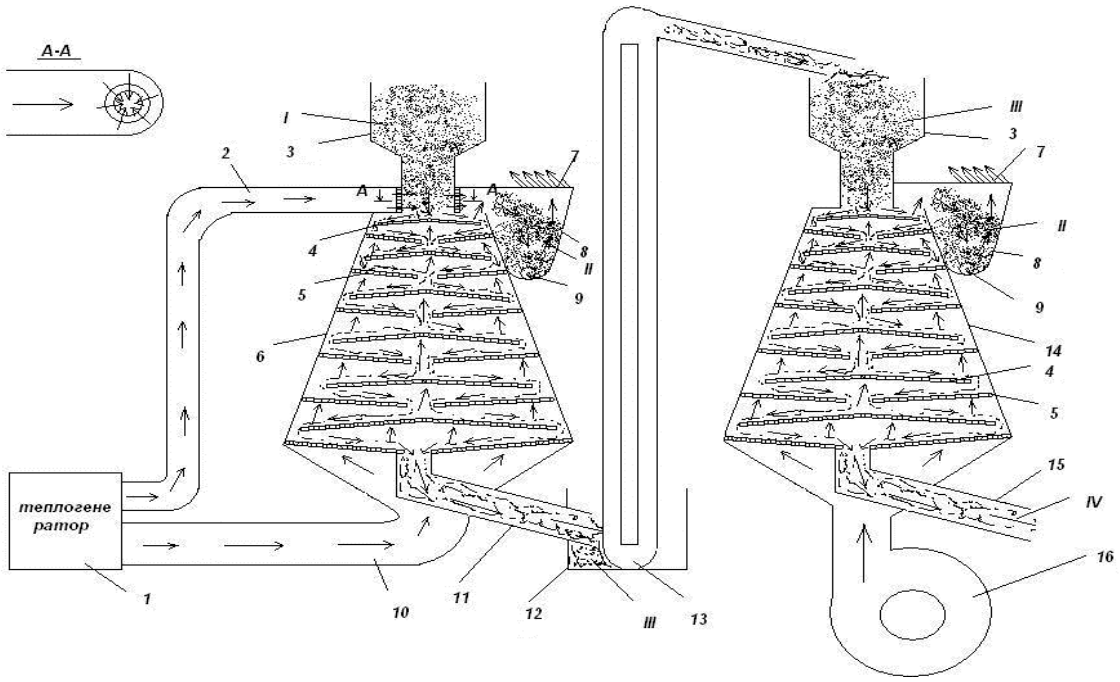
Δ – відстань по горизонталі між ситами, м, (рис. 2).

Друга горизонталь, через яку потім визначається довжина другої решітки, розраховується за формулою:

$$\Delta x_{Ho1} = \frac{H_{o1}}{tg\beta}, \tag{3}$$

$$L_2^{'} = L - \Delta x_{Ho1}. \tag{4}$$

© М.М. Петренко, І.О. Скриннік. 2004



I – сире зерно; II – легкі домішки; III – висушене зерно; IV – охолоджене зерно.
1 – теплогенератор; 2 – патрубок для попереднього підігріву; 3 – бункер; 4 – сітки скріплені між собою; 5 – сітки прикріплені до стінок; 6 – стінка сушильної камери; 7 – жалюзійна сітки; 8 – осаджувальна камера; 9 – шнек; 10 – труба для підводу агента сушки; 11 – трубопровід для висушеного зерна; 12 – бункер для висушеного зерна; 13 – норії для подачі висушеного зерна; 14 – установка для охолодження зерна; 15 – трубопровід; 16 – вентилятор.

Рисунок 1 – Будова зерносушильної установки касетного типу

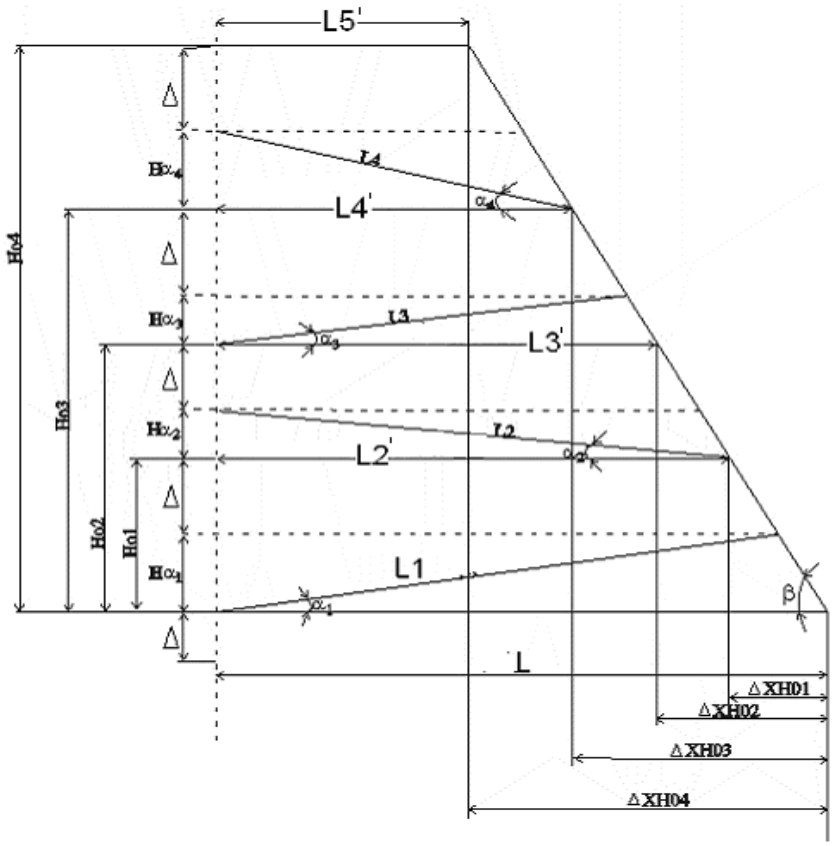


Рисунок 2 – Схема зерносушарки

Довжина другої решітки визначається за формулою:

$$H_{\alpha_2} = tg\alpha_2 \cdot L_2, \quad (5)$$

$$L_2 = \frac{L_2^{'}}{\cos\alpha_2}. \quad (6)$$

Загальна висота визначається за формулою:

$$H_{o2} = H_{o1} + H_{\alpha 2} + \Delta. \quad (7)$$

Третю горизонталь, через яку потім визначається довжина третьої решітки розраховується за формулою:

$$\Delta x_{Ho2} = \frac{H_{o2}}{tg\beta}. \quad (8)$$

$$L_3^{'} = L - \Delta x_{Ho2}. \quad (9)$$

Довжина третьої решітки визначається за формулою:

$$L_3 = \frac{L_3^{'} \cdot \sin\alpha_3}{\sin[\pi - (\beta - \alpha_3)]}. \quad (10)$$

Загальна висота визначається за формулою:

$$H_{o3} = \sin\alpha_3 \cdot L_3, \quad (11)$$

$$H_{o3} = H_{o2} + H_{\alpha 3} + \Delta. \quad (12)$$

Четверту горизонталь, через яку визначається довжина четвертої решітки визначається за формулою:

$$\Delta x_{Ho3} = \frac{H_{o3}}{tg\beta}, \quad (13)$$

$$L_4^{'} = L - \Delta x_{Ho3}. \quad (14)$$

Довжина четвертої решітки визначається за формулою:

$$L_4 = \cos\alpha_4 \cdot L^1_4, \quad (15)$$

$$H_{o4} = \sin\alpha_4 \cdot L_4, \quad (16)$$

$$H_{o4} = H_{o3} + H_{\alpha 4} + \Delta. \quad (17)$$

П’ята горизонталь через яку потім визначається довжина верхньої основи визначається за формулою:

$$\Delta x_{Ho5} = \frac{H_{o4}}{tg\beta}, \quad (18)$$

$$L_5^{'} = L - \Delta x_{Ho5}. \quad (19)$$

Висота зерносушарки визначається за формулою:

$$H = H_{o3} + \Delta + \Delta. \quad (20)$$

Загальна довжина решіток розраховується за формулою:

$$L_{заг} = 2 \cdot (L_1 + L_2 + L_3 + L_4), \quad (21)$$

Загальна площа решіток зерносушарки буде визначатися за формулою:

$$S = SH \cdot L_{заг}, \quad (22)$$

де *SH* – ширина решітки половини сушарки нижньої основи.

Об’єм зерна знаходимо за формулою:

$$V = T \cdot \rho, \quad (23)$$

де *T* – товщина шару зерна.

Маса зерна визначається за формулою:

$$M = V \cdot \rho, \quad (24)$$

де ρ – щільність зерна.

За допомогою пакету прикладних програм MathCad були отримані наступні графіки, при відповідних значеннях вхідних параметрів:

$\alpha_1 = 1°$; $\beta = 74°$;
$\alpha_2 = 1{,}5°$; $\rho = 1350$ кг/м^3;
$\alpha_3 = 2°$; $\Delta = 0{,}25$ м;
$\alpha_4 = 2{,}5°$; L = 0.8 м.

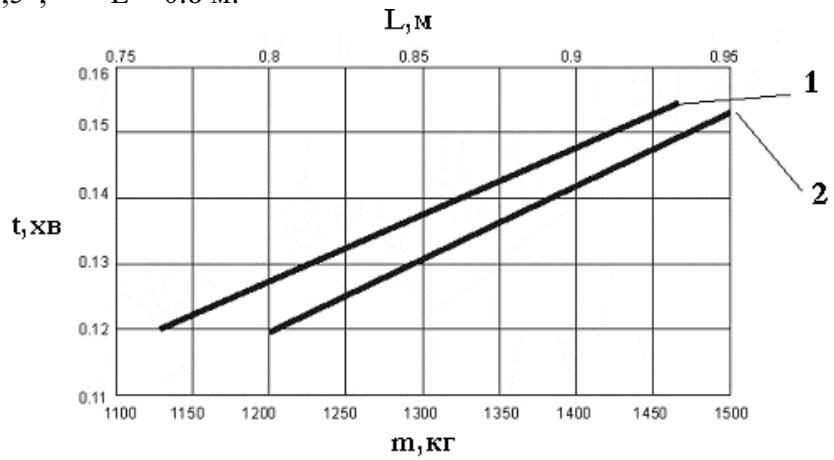


Рисунок 3 – Залежність часу сушки зерна від довжини основи сушарки (1) та від маси матеріалу (2)

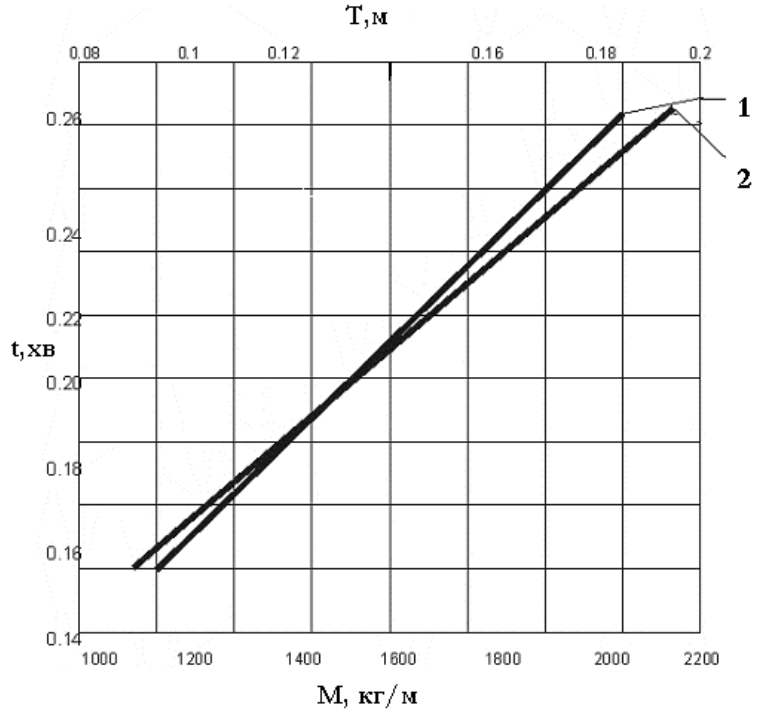


Рисунок 4 –Залежність часу сушки від товщини шару матеріалу (1) на сітках та від маси матеріалу (2) на одиницю довжини сітки

За допомогою графіків можна визначити час сушіння зерна в залежності від довжини сушарки, маси матеріалу, товщини шару матеріалу, та від маси матеріалу на одиницю довжини сітки.

Список літератури

1. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процесах сушки. – М.: Госэнергоиздат, 1956.– 303с.
2. Забродский С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдожиженном слое. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.– 910с.
3. Сыромятников Н.И., Волков В.Ф. Процессы в кипящем слое. – Свердловск: Металлургиздат, 1959.– С. 57-62.
4. Федоров И.М. Теория и расчет процесса сушки. – М.: Госэнергоиздат,1955.-С. 13-49.

УДК 631.362.3:631.562

М.М. Петренко, проф., канд. техн. наук, Д.В. Богатирьов
Кіровоградський національний технічний університет

Порядок визначення основних параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною

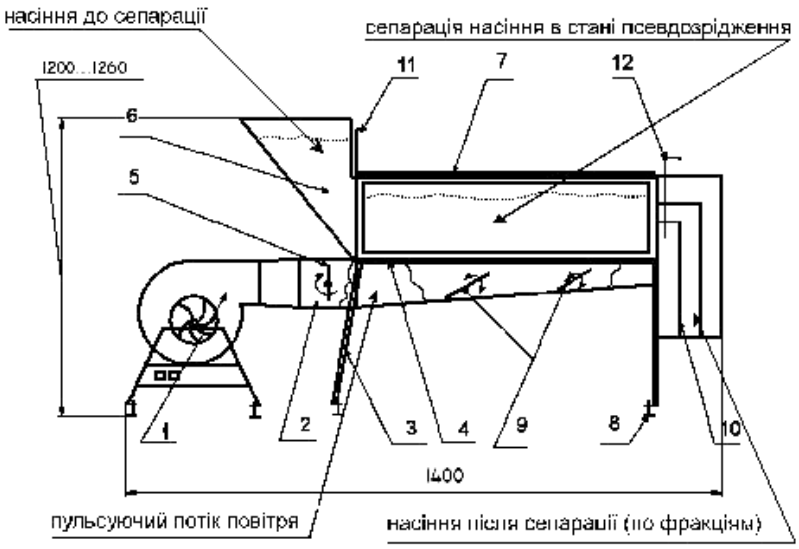
В статті наведено порядок визначення параметрів та режимів роботи пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною згідно проведених теоретичних та експериментальних досліджень
процес сепарації в стані псевдозрідження, пневмоімпульсна машина, пульсуючий потік повітря

Машин які використовують пульсуючий повітряний потік для інтенсифікації процесу сепарації насіння за густиною в стані псевдозрідження майже не вивчені, а тому отримання аналітичних формул для визначення основних параметрів є однією з першочергових задач нашого дослідження.

На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Кіровоградського національного технічного університету розроблено експериментальну пневмоімпульсну машину (ПІМ) для сепарації насіння за густиною (рис. 1) шляхом переведення шару насіння в стан псевдозрідження за допомогою пульсуючого повітряного потоку [1-3]. Метою створення ПІМ є підвищення якісних показників процесу сепарації насіння за густиною. Особливість машини полягає в тому, що в ній поєднано найкращі властивості пневматичних сортувальних столів (ПСС) та пневмотранспортерів (ПТ). Машина пройшла випробовування у приватному сільськогосподарському підприємстві “Влад” (с. Могутнє, Кіровоградського району, Кіровоградської області) і показала наступні характеристики: продуктивність 5,5…6 т/год, технологічний ефект сепарації 92…93%. В якості початкового матеріалу використовували насіння зернових сільськогосподарських культур таких, як пшениця, ячмінь та кукурудза, що пройшли попереднє очищення від домішок.

Процес сепарації відбувається таким чином. Насіння завантажують в повітряний канал 2 (рис. 1) через бункер 6. Товщину шару насіння регулюється регулятором 11. Вентилятор 1 нагнітає повітря повітряний канал 2 через пористу перегородку 4. Пульсатор 5 створює змінний потік повітря, який проходячи через перегородку 4 пронизує шар насіння. Відбувається сепарація в псевдозрідженому шарі насіння за густиною, тобто важкі (з найбільшим значенням густини) опускаються до дна перегородки 4, легкі (з найменшим значенням густини) піднімаються вгору, а середні займають місце між важкими та легкими. Далі класифікований за густиною шар насіння рухається до блоку дільників 10. Повітря виходить через сітку 7, яка сполучається з системою вентиляції або з циклоном. Для інтенсифікації процесу сепарації машина має пульсатор 5, що обертається з меншою кутовою швидкістю ніж вентилятор і призначений для зміни швидкості фільтрації $\omega_ф$ в межах, які не дозволяють перейти псевдозрідженному станові в киплячий – при якому неможлива сепарація, так як це є режим пневмотранспорту [4], тобто створює пульсуючий потік повітря.

© М.М. Петренко, Д.В. Богатирьов. 2004



1 – вентилятор з приводом та блоком керування; 2 – повітряний канал; 3 – рама; 4 – пориста перегородка; 5 – пульсатор з приводом та лопаттю яка має змінний діаметр; 6 – бункер; 7 – сітка для виходу повітря; 8 – регулятор кута нахилу повітряного каналу; 9 – регульовані заслінки; 10 – блок дільників; 11 –регулятор висоти шару насіння в каналі; 12 – регулятор висоти встановлення дільників

Рисунок 1 – Пневмоімпульсна машина для сепарації насіння за густиною (ПІМ)

Для забезпечення найбільш сприятливих умов протікання процесу псевдозрідження потрібно щоб виконувалась умова [4]:

$$a \geq 30 \cdot d_e, \qquad (1)$$

де a – ширина каналу, м;

d_e – еквівалентний діаметр частки, м.

Висоту каналу можна визначити в залежності від початкової висоти h та порозності ε шару насіння, в стані псевдозрідження, з умови [2, 4]:

$$b \geq h / \varepsilon . \qquad (2)$$

Експериментально доведено (рис.2-3), що робочу довжину каналу слід обирати в межах L=0,5…1 м, що дозволяє поєднати найкращі значення показників якості машини, такі як продуктивність (Q) та технологічний ефект сепарації (ТЕС).

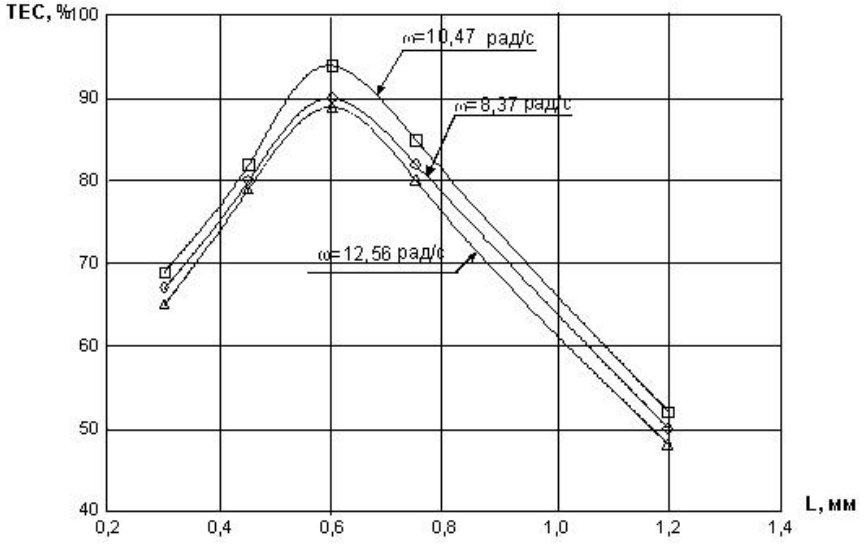


Рисунок 2 – Графік впливу робочої довжини перегородки на технологічний ефект сепарації (ТЕС)

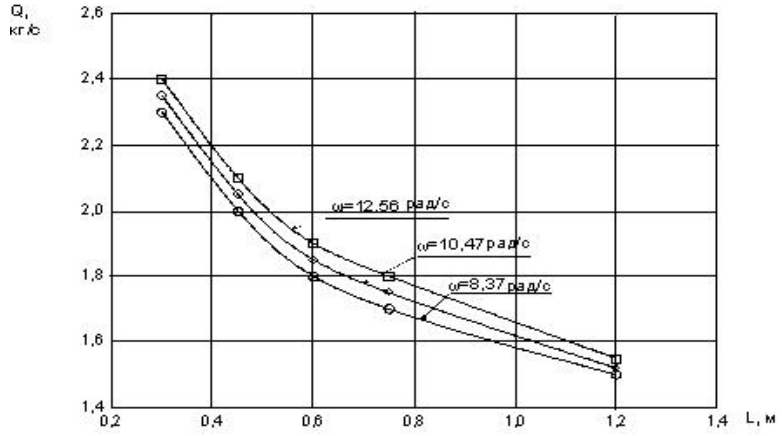


Рисунок 3 – Графік впливу робочої довжини перегородки на продуктивність (Q)

Кутову швидкість лопатевого колеса пульсатора (ω_n) в залежності від густини найважчої з часток матеріалу та довжини перегородки можна визначити за формулою використовуючи дослідження [2, 5, 6]:

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot \omega_\phi^T}{L} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho + \rho_c} \right), \tag{3}$$

де ω_ϕ^T – табличне значення швидкості фільтрації для даного матеріалу при степені псевдозрідження $n \le 2{,}5$ [4];

ρ, ρ_c – густина частки та середовища, кг/м^3.

Наступним етапом підрахунку є визначення тиску, який потрібен давати вентилятор $P_в$ для забезпечення процесу сепарації насіння за густиною.

$$P_B = 1{,}1 \cdot (P_1 + P_2 + P_3 + P_4), \tag{4}$$

де P_1, P_2, P_3, P_4 – відповідно опір пульсатора, шару насіння, перегородки та втрати повітряної системи, кПа.

Опір шару насіння визначаємо за відомою формулою:

$$P_2 = g \cdot h \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (\rho + \rho_c). \tag{5}$$

Блохін П.В. [4] запропонував наступну формулу для визначення опору перегородки в залежності від матеріалу та кількості шарів:

$$P_3 = f \cdot (\omega_\phi^T)^W, \tag{6}$$

де f і w – дослідні коефіцієнти з табл. 13 [4].

Опір пульсатора

$$P_1 = (\xi + k) \cdot (P_2 + P_3), \tag{7}$$

де ξ – коефіцієнт опору пульсатора в горизонтальному положенні [5];

k – коефіцієнт пропорційності і визначається за формулою

$$k = \frac{a_П \cdot D_П}{a \cdot d} \cdot \left| \sin(\omega_П \cdot t) \right|, \tag{8}$$

в якій $a_п$ та $D_п$ – відповідно ширина діаметр лопатевого колеса пульсатора, м.

Визначаємо втрати повітряної системи

$$P_4 = k_1 \cdot (P_1 + P_2 + P_3), \tag{9}$$

де k_1 – коефіцієнт втрат повітря повітряною системою.

Для вибору типу вентилятора потрібно також знати витрати повітря сепаратором:

$$q = 1{,}1 \cdot b \cdot L \cdot \omega_{\phi}^{T}. \quad (10)$$

Після вибору вентилятора згідно отриманих значень q та $P_в$ слід зробити перевірку ступеня псевдозрідження згідно умови:

$$n = \frac{\omega_{\phi}}{\omega_{кр}} \le 2{,}5, \quad (11)$$

де ω_{ϕ} – дійсна швидкість фільтрації, яку визначаємо за формулою:

$$\omega_{\phi} = \frac{1}{(a \cdot L)^2} \cdot \sqrt{\frac{P_E}{(1-\varepsilon) \cdot (\rho_B - \rho_c) \cdot \left(1 + \frac{D_{П}^2}{a \cdot b} \cdot \sin(\omega_n \cdot t)\right) + \rho_c \cdot k_T \cdot \frac{(a+b)}{a \cdot b}}}, \quad (12)$$

в якій $\omega_{кр}$ – критична швидкість псевдозрідження, при найбільшому опорі шару і в залежності від геометричних та фізико-механічних властивостей матеріалу, визначається за формулою [4, 6]:

$$\omega_{кр} = \frac{\nu}{d_e} \cdot \mathrm{Re}_{кр}, \quad (13)$$

де *v* – коефіцієнт кінематичної в'язкості середовища;

$Re_{кр}$ – критичне значення числа Рейнольдса, яке знаходять як функцію від числа Архімеда $Ar = \frac{g \cdot d_e^3}{\nu} \cdot \frac{\rho - \rho_c}{\rho_c}$, тобто $\mathrm{Re}_{кр} = 0{,}0121 \cdot \mathrm{Ar}^{0{,}66}$.

Продуктивність сепаратора

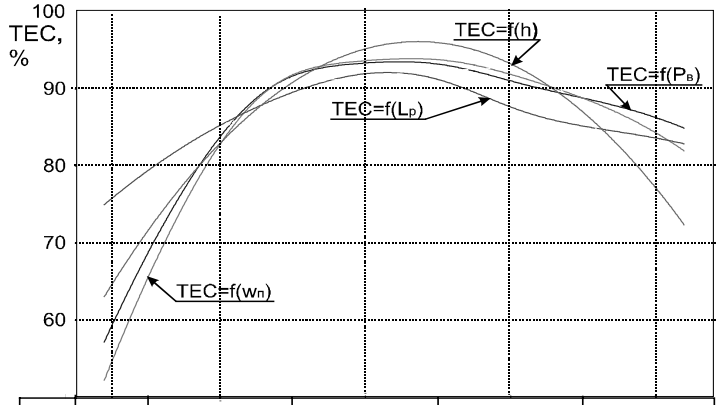
$$Q = b \cdot h \cdot V_c \cdot (1-\varepsilon), \quad (14)$$

де V_c – середня швидкість руху матеріалу по поверхні перегородки, яку можна визначити за формулою:

$$Vc = \frac{4 \cdot \rho_c}{\rho + \rho_c} \cdot \omega_{\phi} \cdot \cos\alpha, \quad (15)$$

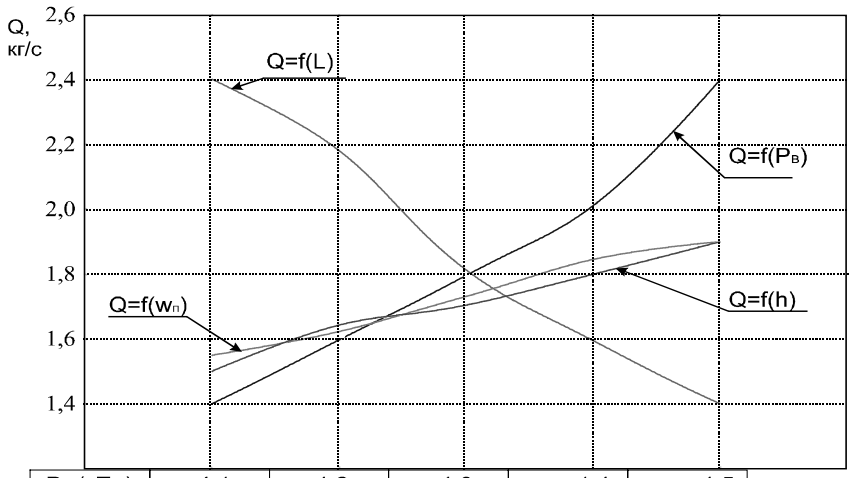
де α – кут нахилу перегородки, град.

На рис. 4-5 наведено номограми для визначення продуктивності та технологічного ефекту сепарації в залежності від параметрів ПІМ.



Pв	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5 (кПа)
Wп	6,28	8,37	10,47	12,56	14,65(рад/с)
Lр	0,1	0,3	0,6	0,9	1,2 (м)
h	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12 (м)

Рисунок 4 – Номограма для визначення технологічного ефекту сепарації (ТЕС) в залежності від параметрів машини



Pв (кПа)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$w_п$ (рад/с)	6,28	8,37	10,47	12,56	14,65
L (м)	0,1	0,3	0,6	0,9	1,2
h (м)	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12

Рисунок 5 – Номограма для визначення продуктивності машини (Q) в залежності від параметрів машини

Проведені експериментальні дослідження дослідної пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною наступні висновки:

- стійка роботи ПІМ спостерігається при наступних значеннях найбільш впливових параметрів P_v=(1,3…1,4) кПа, $\omega_п$=(10,47…12,56) рад/с, L=0,6м, L_c=0,3м, h=(0,1…0,12)м та α=2°. При цьому значення технологічного ефекту сепарації (ТЕС) та продуктивності (Q) знаходяться в інтервалі ТЕС=89…93% і Q=1,6…1,9 кг/с;
- сепарація насіння за густиною в стані псевдозрідження з використанням пульсуючого повітряного потоку дозволяє підвищити продуктивність на 1,1…1,2 кг/с та покращити технологічний ефект сепарації на 8…13%;
- експериментальні дослідження підтвердили доцільність використання пульсатора шляхом встановлення його в повітряний канал і замінити коливальний рух деки на пульсуючий потік повітря, що дозволило:
  1) зменшити робочу площу деки;
  2) зменшити потужність електричного двигуна;
  3) істотно покращити якісні показники роботи;
- підрахований економічний ефект станом на 1.06.2004 р. складатиме:
  1) для споживача машини – 11 149 грн.;
  2) для виробника машини – 4 693 грн.;
- посівні властивості обробленого матеріалу показали підвищення показників по всім параметрам в середньому на 2-3% і підтвердили ствердження про доцільність сепарації насіння за таким показником як густина.

Список літератури

1. Комаристов В.Ю., Петренко М.М. Довідник з механізації після збиральної обробки зерна. – К.: Урожай, 1990. – 194 с.
2. Петренко М.М., Богатирьов Д.В. Теоретичні дослідження пневмоімпульсної сепарації за густиною. // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Випуск 32.– Кіровоград: КДТУ, 2002.– С. 140-146.
3. Пневмоімпульсна машина для сепарації насіння за густиною / М.М. Петренко, Д.В. Богатирьов.- Пат. 54270 А Україна, МПК 7 А01С1/00.- №2002075688; Заяв. 10.07.2002; Опубл. 17.02.2003. Бюл. № 2. - С. 3.
4. Блохин П.В. Аэрогравитационный транспорт. – М.: Колос, 1974. – 120 с.
5. Идельчик И.Е. Аэродинамика технологических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 278-281.
6. Лаврентьев М.А, Шабат Б.А. Проблемы гидродинамики и их математические модели.– М.: Наука, 1973.– 407 с.

УДК 631.354

С.І. Шмат, доц., канд. техн. наук, В.А. Резніченко
Кіровоградський національний технічний університет

Прогнозування надійності нових машин за результатами випробувань

На сучасному етапі проектування надійності майбутніх машин, знарядь та обладнання важко врахувати через наявність багатьох чинників, які впливають на функціонування виробів. Стаття присвячена теоретичному аналізу підвищення ефективності та точності прогнозування нових машин і практичному втіленню прогнозування.

надійність техніки, прогнозування, фактори впливу, показники надійності, кореляція факторів, коефіцієнт перерахування

Для достовірного прогнозування кількісних показників надійності сільськогосподарської техніки необхідно враховувати вплив на них комплексу зовнішніх механічних і грунтово-кліматичних факторів, а також факторів серійного виробництва і реальних умов експлуатації с.г. машин.

Проблему можливо вирішити за допомогою математичних моделей, що найкраще описують залежності між τ-м кількісним показником надійності і зазначених факторів ($\vec{\upsilon}$):

$$Z_i^{(\tau)} = f_i^{(\tau)}(\upsilon_1;\upsilon_2;.....;\upsilon_\theta), \qquad (1)$$
$$\tau = 1,2,...,n,$$

де θ — число усіх факторів;

n — число кількісних показників надійності, яке характеризує машину i-го найменування;

$f_i^{(\tau)}(\vec{\upsilon})$ — векторна функція, що дозволяє, також, змінюючи рівень факторів, які впливають на надійність техніки, знайти оптимальні значення кількісних показників.

Для побудови функції необхідний достатній обсяг статистичної інформації, яку можна одержати з протоколів випробувань або шляхом постановки експериментів [1] з фіксацією різних значень факторів, за якими визначаються кількісні показники надійності. Однак задача ця досить трудомістка і для її рішення потрібні великі матеріальні і трудові витрати.

Прогнозування кількісних показників надійності нової сільськогосподарської техніки можливе за результатами прискорених випробувань експериментальних зразків [3]. При цьому вплив деяких факторів (механічних, грунтово-кліматичних, агресивність середовища) на надійність враховуються в результатах прискорених випробувань, а іншої частини (серійного виробництва і реальної експлуатації), імітація яких неможлива при проведенні прискорених випробувань, — у математичних моделях [4].

У цьому випадку зв'язок між оцінкою $\hat{Z}_{ije}^{(\tau)}$ τ-го кількісного показника надійності (i-го найменування майбутньої машини в j-й грунтово-кліматичній зоні) і середнім значенням цього показника $\overline{Z}_i^{(\tau)}$, отриманим за результатами прискорених дослідів μ зразків техніки, описується складною функціональною залежністю:

$$\hat{Z}_{ije}^{(\tau)} = G^{(\tau)}(\overline{Z}_i^{(\tau)};\vec{U}_i(t);a_i^{(\tau)};a_{ij}^{(\tau)}), \qquad (2)$$

© С.І. Шмат, В.А. Резніченко. 2004

$$\tau = 1,2,...,n,$$

де $\vec{U}_i(t) = (\vec{\Phi}_{\Pi i}(t); \vec{\Phi}_{ei}(t))$ — найважливіші некорельовані узагальнені фактори серійного виробництва і реальної експлуатації [5];

$a_i^{(\tau)}; a_{ij}^{(\tau)}$ — невідомі параметри математичної моделі (2), що характеризують групу факторів серійного виробництва заводу-виготовлювача і реальних умов експлуатації;

$$\vec{\Phi}_{\Pi i}(t) = (\Phi_{\Pi 1}(t); \Phi_{\Pi 2}(t); ...; \Phi_{\Pi m}(t));$$
$$\vec{\Phi}_{ei}(t) = (\vec{\Phi}_{ei1}(t); \Phi_{ei2}(t); ...; \Phi_{eil}(t)); \quad (3)$$

де $m = 5,\ l = 6$ - число найважливіших некорельованих узагальнених факторів серійного виробництва і реальної експлуатації [5].

Середнє значення $\overline{Z}_i^{(\tau)}$ за результатами прискорених випробувань μ експериментальних зразків (як правило, випробуються 2-3 зразки) визначається формулою

$$\overline{Z}_i^{(\tau)} = \mu^{-1} \Sigma_{k=1}^{\mu} \hat{Z}_{ik}^{(\tau)} \quad (4)$$

Необхідно відзначити, що питання про постановку на серійне виробництво нових або модернізованих зразків вирішується сьогодні не тільки за результатами державних приймальних випробувань на МВС експериментальних зразків без достатнього визначення впливу факторів серійного виробництва і експлуатації машин, але й за результатами менеджменту, виставок та ярмарок по продажу нової техніки. Однак відомо, що показники надійності за результатами приймальних випробувань експериментальних зразків значно відрізняються від показників, отриманих для серійної техніки.

Оскільки результати прискорених випробувань не залежать від факторів, імітація яких неможлива, у моделі (2) розділимо змінні на окремі частини

$$\hat{Z}_{ije}^{(\tau)} = K_{ij}^{(\tau)}(\vec{\Phi}_{\Pi i}(t); \vec{\Phi}_{ei}(t); a_i^{(\tau)}; a_{ij}^{(\tau)}) \overline{Z}_i^{(\tau)}, \quad (5)$$

де $K_{ij}^{(\tau)}$ — коефіцієнти перерахування оцінок кількісного показника надійності майбутньої серійної машини щодо середніх значень цих же показників, отриманих при прискорених випробуваннях її експериментальних зразків.

Коефіцієнти перерахування залежать від факторів серійного виробництва і реальної експлуатації, а ті, у свою чергу, від значень невідомих параметрів. Для машин різних найменувань і марок, а також з різними показниками надійності значення коефіцієнтів перерахування неоднакові, оскільки рівні найважливіших факторів як серійного виробництва на заводах-виготовлювачах, так і реальної експлуатації в різних грунтово-кліматичних зонах також різні. Значення коефіцієнтів перерахування для різних показників надійності можуть бути як більшими 1, так і меншими 1.

Отже, коефіцієнти перерахування є функціоналами:

$$K_{ij}^{(\tau)} = F^{(\tau)}\left\{f(\vec{\Phi}_{\Pi i}(t); \vec{\Phi}_{ei}(t); a_i^{(\tau)}; a_{ij}^{(\tau)})\right\}, \quad (6)$$

де $f(\vec{\Phi}_{\Pi i}(t); \vec{\Phi}_{ei}(t); a_i^{(\tau)}; a_{ij}^{(\tau)})$ - функція, що визначає рівень впливу найважливіших некорельованих узагальнених факторів серійного виробництва і реальної експлуатації техніки на її надійність.

Найважливіші фактори характеризуються вагомостями $\vec{P}$, $\vec{Q}$ і фактичними рівнями $\vec{X}_i, \vec{Y}_j$. З огляду на дискретну залежність факторів від часу, розглянемо функцію впливу статистичної задачі прогнозування надійності техніки:

$$K_{ij}^{(\tau)} = F^{(\tau)}\{f(\vec{X}_i;\vec{P};\vec{Y}_j;\vec{Q};a_i^{(\tau)};a_{ij}^{(\tau)})\}, \quad (7)$$

де $\vec{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{im})$, $\vec{Y}_j = (y_{j1}, y_{j2}, ..., y_{jl})$ - вектори значень фактичних рівнів факторів серійного виробництва і реальної експлуатації;

$\vec{P} = (p_1, p_2, ...p_m)$, $\vec{Q} = (q_1, q_2, ..., q_l)$ - вектори значень середніх питомих вагомостей факторів серійного виробництва і реальної експлуатації.

Значення фактичних рівнів і середніх вагомостей найважливіших факторів серійного виробництва для різних заводів-виготовлювачів, а також опосередковані значення фактичних рівнів і вагомостей найважливіших факторів реальної експлуатації для різних грунтово-кліматичних зон вивчаються за даними протоколів і актів випробувань.

Побудуємо конкретний вид функції впливу, за допомогою якої можна визначити:

- рівень загального впливу всіх найважливіших некорельованих узагальнених факторів серійного виробництва і реальної експлуатації;
- рівень впливу окремих груп факторів (група факторів серійного виробництва і група факторів реальної експлуатації) на надійність техніки;
- рівень впливу окремих факторів.

Очевидно, що вид функції $f(\vec{X}_i;\vec{P};\vec{Y}_j;\vec{Q};a_i^{(\tau)};a_{ij}^{(\tau)})$ для всіх кількісних показників надійності однаковий, тому що форма впливу різних факторів серійного виробництва і реальної експлуатації ідентична для всіх показників надійності. Однак значення функції для окремих показників надійності можуть відрізнятись. Ця відмінність також враховується невідомими параметрами $a_i^{(\tau)}$ та $a_{ij}^{(\tau)}$, які для кожного кількісного показника надійності, для кожного найменування машини і для кожної грунтово-кліматичної зони повинні мати свої конкретні значення.

Накладемо на цю функцію наступні вимоги: вона завжди позитивна; максимальне її значення дорівнює 1, що дозволить при побудові функціонала (7) спростити математичну модель. Крім того відомо що, середній наробіток на відмову експериментальних зразків за результатами прискорених випробувань завжди більший наробітку серійних машин в господарських умовах, а середні витрати часу на відновлення, навпаки, для експериментальних зразків завжди менші, ніж для серійних.

Отже, коефіцієнт перерахування для середнього наробітку на відмову і середні витрати часу на відновлення можна характеризувати залежностями:

$$K_{ij}^{(\tau)} = f(\vec{X}_i;\vec{P};\vec{Y}_j;\vec{Q};a_i^{(1)};a_{ij}^{(1)}) \quad (8)$$

$$K_{ij}^{(\tau)} = 1/f(\vec{X}_i;\vec{P};\vec{Y}_j;\vec{Q};a_i^{(2)};a_{ij}^{(2)}) \quad (9)$$

З урахуванням некорельованості як окремих факторів, так і їхніх груп після деяких перетворень для функції впливу одержимо наступний вираз:

$$f(\vec{X}_i;\vec{P};\vec{Y}_j;\vec{Q};a_i^{(\tau)};a_{ij}^{(\tau)}) = C_П \sum_{k=1}^{m} \alpha (a_i^{(\tau)})^{1-x_{ik}} + C_e \sum_{k=1}^{l} \beta_k (a_{ij}^{(\tau)})^{1-y_{ik}}, \quad (10)$$

де $C_П = 1 - b_П$, $C_e = 1 - b_e$, - нормативні коефіцієнти, пов'язані із середніми питомими вагомостями $b_П$, b_e з окремих груп факторів.

За результатами досліджень [2] $b_П = 0.47$; $b_e = 0.53$.

Введення нормативних коефіцієнтів $C_П$ і $C_э$ підтверджується тим, що якщо вагомість груп факторів вища, то зниження надійності техніки, обумовлене цією групою, повинно бути більше, тобто кількісне значення функції впливу повинно бути менше.

Аналогічно введені і нормовані коефіцієнти α_k, β_k :

$$\alpha_k = (1 - p_k)/(m-1);$$
$$\beta_k = (1 - q_k)/(l-1). \quad (11)$$

Невідомі параметри $a_i^{(\tau)}$ та $a_{ij}^{(\tau)}$ приймають для машин-попередників, тому що для нових або модернізованих машин їх установити неможливо. Зокрема, $a_{ij}^{(\tau)}$ визначають шляхом порівняння значень τ-го кількісного показника надійності машини i-го найменування, отриманих при прискорених випробуваннях μ експериментальних зразків в результаті спостереження за ν зразками в реальній експлуатації.

Ці рівності задовольняють вимогам, пред'явлених до функції впливу.

Невідомий параметр $a_{ij}^{(\tau)} = b_{1ij}^{(\tau)}$ визначається сумою параметрів $a_{ij}^{(\tau)} = b_{1ij}^{(\tau)}$:

$$a_i^{(\tau)} = N^{-1}\Sigma_{j=1}^{N} a_{ij}^{(\tau)}, \quad (12)$$

де N — число грунтово-кліматичних зон, у господарствах яких проведені спостереження за машинами-попередниками. Очевидно, що при $N = 1$ значення невідомих параметрів $a_i^{(\tau)}$ і $a_{ij}^{(\tau)} = b_{1ij}^{(\tau)}$ збігаються.

Таким чином, для прогнозування середнього наробітку на відмову $\hat{T}_{oije}$ і середніх витрат часу на відновлення $\hat{T}_{вijэ}$ можна рекомендувати наступні формули:

$$\hat{T}_{oije} = \overline{T}_{oi}[C_{П}\Sigma_{k=1}^{m}\alpha_k (a_i^{(1)})^{1-x_{ik}} + C_e\Sigma_{k=1}^{l}\beta_k (a_{ij}^{(1)})^{1-y_{ik}}]; \quad (13)$$

$$\hat{T}_{вije} = \overline{T}_{вi}/[C_{П}\Sigma_{k=1}^{m}\alpha_k (a_i^{(2)})^{1-x_{ik}} + C_e\Sigma_{k=1}^{l}\beta_k (a_{ij}^{(2)})^{1-y_{ik}}], \quad (14)$$

де $\hat{T}_{oi}$ і $\hat{T}_{вi}$ — середні значення відповідно середнього наробітку на відмову і середні витрати часу на відновлення, отримані за результатами прискорених випробувань μ експериментальних зразків. Коефіцієнт готовності визначають за формулою, зазначеною в ГОСТ 27.002—83 «Надійність у техніці. Терміни і визначення»:

$$\hat{K}_{Гije} = \hat{T}_{oije}/(\hat{T}_{oije} + \hat{T}_{вije}). \quad (15)$$

За результатами приймальних випробувань на МВС для зернових сівалок СЗ-5,4 [6] отримані прогнозні значення середнього наробітку на відмову, середніх витрат часу на відновлення і коефіцієнта готовності (табл. 1).

Таблиця 1

Показники надійності	СЗ-5,4		СЗ-3,6	
	ЦВТ	Півд-Укр. МВС	ЦВТ	Півд-Укр. МВС
Середній наробіток на відмову, год.	20,3	17,6	27,9	23,4
Середні витрати на відновлення, год.	1,12	0,92	0,91	0,87
Коефіцієнт готовності	0,965	0,948	0,98	0,97

Як попередники для сівалок СЗ-5,4 розглянуті серійні машини СЗ-3,6А. Показники їхньої надійності отримані за результатами періодичних випробувань на МВС [6], а також у реальних умовах експлуатації (табл. 1).

У реальній експлуатації інформацію про показники надійності серійних машин збирали також в господарствах Кіровоградської області. Спостереження вели за чотирма машинами СЗ-3,6А. Результати досліджень приведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Номер машини	Середній наробіток на відмову, год.	Середні витрати часу на відновлення, год.	Коефіцієнт готовності
1	26,3	1,2	0,91
2	21,4	1,7	0,94
3	29,6	1,3	0,95
4	31,7	0,9	0,98
Середнє значення	27,3	1,27	0,95

За допомогою формул (11) визначені нормативні коефіцієнти α_k та β_k, що відповідають питомим середнім вагомостям найважливіших факторів серійного виробництва і реальної експлуатації (таблиця 3).

Таблиця 3

Нормовані коефіцієнти	1	2	3	4	5
p_k	0,23	0,22	0,21	0,17	0,16
a_k	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21
q_k	0,23	0,23	0,21	0,13	0,11
β_k	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18

За допомогою формул, (10-12), а також даних таблиць 1 і 2 знайдені невідомі параметри $a_i^{(\tau)}$ і $a_{ij}^{(\tau)}$ (табл. 4).

Таблиця 4

Показники надійності	СЗ-3,6		
	1	2	3
Середній наробіток на відмову	0,71	0,86	0,93
Середні витрати на відновлення	0,78	0,87	0,92

За результатами досліджень [2], а також за допомогою формул (8) - (10) і даних табл. 3 і 4 отримані коефіцієнти перерахування для обстежуваних машин (табл. 5).

Таблиця 5

Показники надійності	СЗ-5-4		
	1	2	Середні дані
Середній наробіток на відмову	0,67	0,74	0,705
Середні витрати на відновлення	0,91	0,94	0,925

За допомогою формул (13) - (15), а також даних табл. 1 і 5 прогнозований середній наробіток на відмову, середні витрати часу на відновлення і коефіцієнти готовності майбутніх машин (табл. 6).

Таблиця 6

Показники надійності	СЗ-5,4					
	1	2	3	4	5	6
Середній наробіток на відмову, год.	14,31	12,41	18,54	15,09	20,87	22,35
Середні витрати на відновлення, год.	1,04	0,85	1,11	1,57	1,20	0,83
Коефіцієнт готовності	0,951	0,963	0,968	0,943	0,958	0,955

Таким чином, після постановки на серійне виробництво машин СЗ-5-4 і після їх експлуатації в господарствах Кіровоградської області середній наробіток на відмову знизиться в 1,56 рази, а середні витрати часу на відновлення підвищаться в 1,41 рази в порівнянні з результатами приймальних випробувань дослідних зразків, що свідчать також і про зниження показників надійності цих машин порівняно з сівалкою СЗ-3,6А.

Таким чином, для рішення питання про постановку зазначених машин на серійне виробництво необхідно враховувати приведені результати досліджень.

Список літератури

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.—М.: Наука, 1976.
2. Влияние технического обслуживания на надежность элементов конструкции двигателя Д-37Е/В. М. Стариков и др. // Тракторы и сельхозмашины,— 1976, № 7.
3. Клятис Л.М. Ускоренная оценка с.-х. машин. — М.: Агропромиздат, 1985.
4. Клятис Л.М., Нахатакян Р.Х. Прогнозирование надежности с.-х. техники по результатам ускоренных испытаний // Тракторы и сельхозмашины.—1990, № 11.
5. Нахатакян Р.Х., Клятис Л.М. Факторы производства и эксплуатация с.-х. техники, влияющие на ее надежность // Тракторы и сельхозмашины.—1990, № 11.
6. Протоколи випробувань зернових сівалок на Південно–Українській МВС, 1986...1999. Херсон, ПУ МВС.

УДК 621.391

Д.В. Калашнік, канд. техн. наук, Р.М. Минайленко
Кіровоградський національний технічний університет

Побудова фільтру на основі нелінійних елементів для вимірювання електричних сигналів з завадою короткочасної дії та великої амплітуди

В статті запропоновано методику побудови фільтру на основі нелінійних елементів для вимірювання електричних сигналів з завадою короткочасної дії і великої амплітуди.
фільтр, завада, пристрій

Останнім часом все більшу інтенсивність на підприємствах і сільському господарстві набуває процес впровадження автоматизованих систем контролю та управління технологічними процесами. В окремих випадках автоматизовані системи будуються по централізованому принципу, що обумовлено як економічними, експлуатаційними так і вимогами вибухонебезпеки.

В таких системах, побудованих по централізованому принципу, первинні перетворювачі знаходяться на значній відстані від систем збору і обробки інформації. Внаслідок цього на пристрій вимірювання поступає корисний сигнал x(t) з адитивною завадою n(t) (1):

$$z(t) = x(t) + n(t), \tag{1}$$

де *z(t)* – сигнал на вході системи вимірювання.

Тому в працях [1],[2] була доведена доцільність і запропоновано використання в системі вимірювання фільтру на основі лінійних нестаціонарних функцій, що описується системою диференційних рівнянь (2):

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = k_1 \Delta x(t) + \dot{a}_2(t) \\ \dot{a}_2(t) = k_2(t) \Delta x(t) \end{cases}, \tag{2}$$

де $\dot{\hat{x}}(t)$ - сигнал на виході фільтра;

k_1, k_2 – лінійні нестаціонарні коефіцієнти фільтра;

$\Delta x(t) = z(t) - \dot{\hat{x}}(t)$.

При цьому реалізація такого фільтра зводиться до системи зі змінними в часі параметрами. Це викликає значні труднощі при апаратній реалізації. В [3] було запропоновано реалізацію системи рівнянь (2) на основі нелінійних стаціонарних функцій (3), а також метод визначення цих нелінійних функцій.

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = f_1(\Delta x) \Delta x(t) + \dot{a}_2(t) \\ \dot{a}_2(t) = f_2(\Delta x) \Delta x(t) \end{cases}, \tag{3}$$

де $f_1(\Delta x), f_2(\Delta x)$ – нелінійні стаціонарні функції.

Перехід до нелінійних функцій значно спростив апаратну реалізацію фільтра.

Структурна схема фільтра на основі нелінійних функцій представлена на рис. 1.

© Д.В. Калашнік, Р.М. Минайленко. 2004

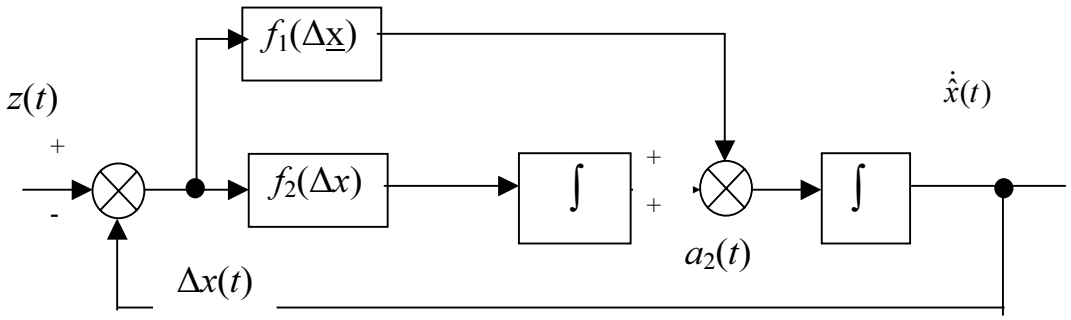


Рисунок 1 - Структурна схема фільтра на основі нелінійних елементів

З допомогою запропонованого методу були отримані нелінійні функції $f_1(\Delta x)$ і $f_2(\Delta x)$ представлені на рис.2. Значення $\Delta x = \Delta x_1$, для якого були отримані ці функції, залежить від рівня завади, наявної у вхідному сигналі і визначається на основі апостеріорних даних.

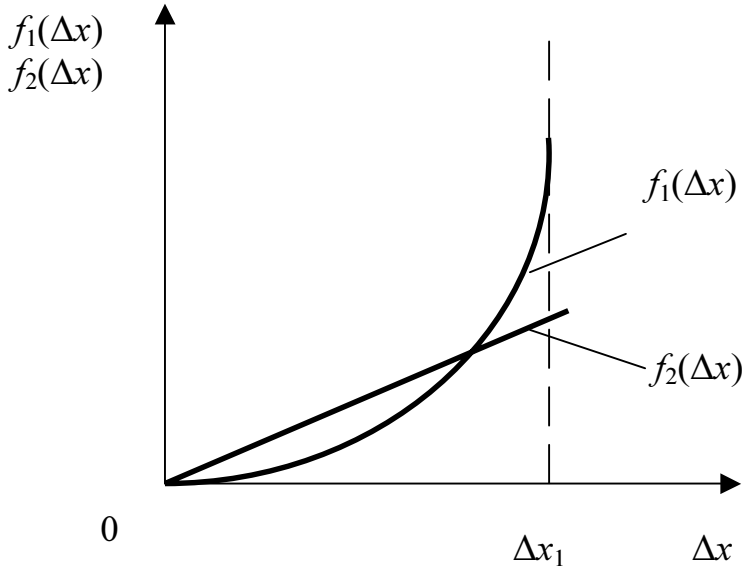


Рисунок 2 – Графіки нелінійних функцій $f_1(\Delta x)$ і $f_2(\Delta x)$

Запропонований фільтр було використано в пристрої вимірювання системи контролю навантаження електродвигунів норій, яка входить до складу автоматизованої системи управління технологічними процесами на елеваторі Кіровоградського комбінату хлібопродуктів №2. Але в ході експлуатації системи, показання навантаження електродвигунів, в деякі моменти часу, відрізнялись від реальних значень. Ця обставина ускладнила використання системи контролю навантаження.

Проведені додаткові дослідження на підприємстві показали, що сигнал, який вимірюється з трансформаторів струму, проходить по аналоговим лініям зв'язку, прокладених в безпосередній близькості від проводів силового обладнання. При цьому під час вмикання та вимикання обладнання на підприємстві в вище зазначених аналогових лініях виникають наводки, тобто завади, які по своїй амплітуді значно перевищують прийнятий рівень для системи вимірювання. Також завади виникають із-за нестабільного навантаження обладнання (норія, транспортер) сипучим матеріалом.

Тобто у вхідному сигналі окрім завади $n(t)$ присутня завада $n^1(t)$ (4). При цьому ця завада значно більшої амплітуди і має не тривалу дію в часі (рис. 3).

$$z(t) = n(t) + n^1(t), \tag{4}$$

де $n^1(t)$ – завада короткочасної дії.

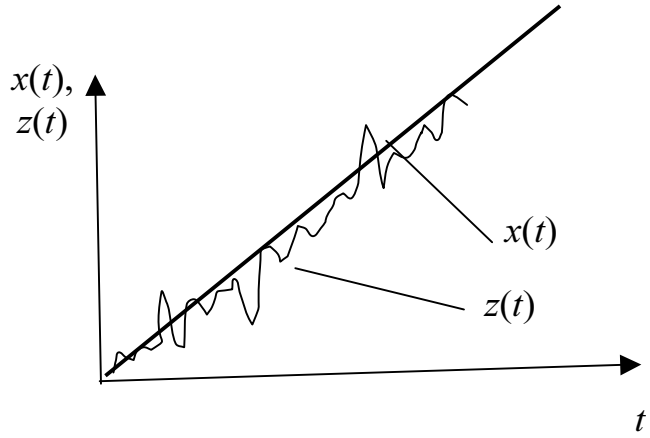


Рисунок 3 – Графік вхідного сигналу на фільтр при наявності завади $n^1(t)$

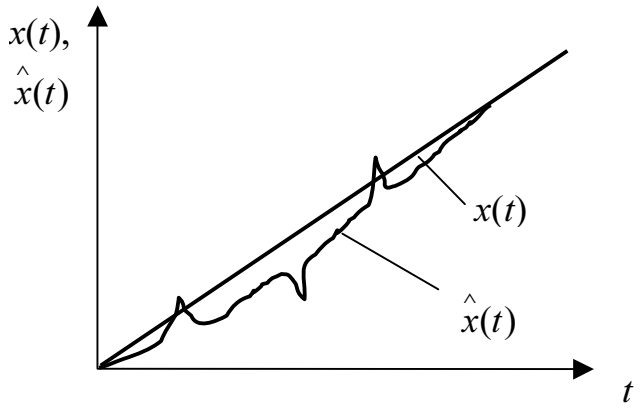


Рисунок 4 – Графік вихідного сигналу фільтра при наявності завади $n^1(t)$

Для вирішення даної проблеми (відслідковування завади $n^1(t)$) були проведенні додаткові теоретичні дослідження. З допомогою математичного моделювання на ЕОМ були отриманні залежності нелінійних стаціонарних функцій $f_1(\Delta x)$ і $f_2(\Delta x)$ для значень $\Delta x(t)$ значно більшого за Δx_1 (рис. 5).

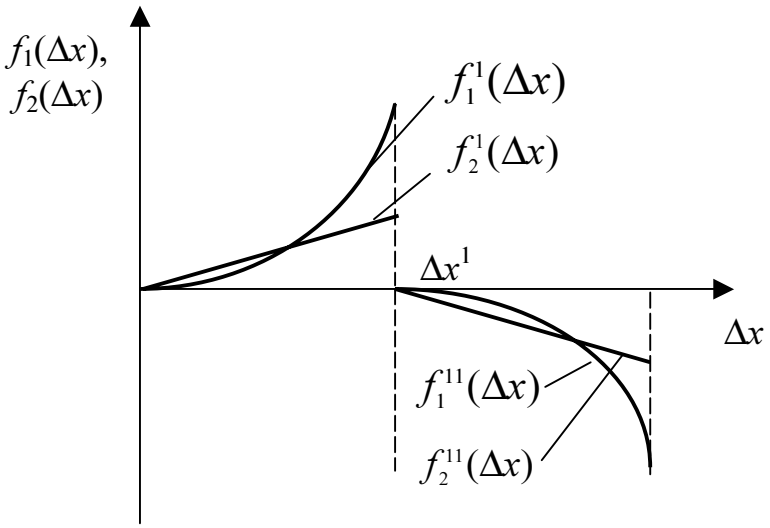


Рисунок 5 – Графіки нелінійних функцій $f_1(\Delta x)$ і $f_2(\Delta x)$ при великому значенні вхідного сигналу Δx

Як видно, з отриманих графіків, нелінійні функції $f_1(\Delta x)$ і $f_2(\Delta x)$ розкладаються на дві частини $f_1^1(\Delta x)$, $f_1^{11}(\Delta x)$ і $f_2^1(\Delta x)$, $f_2^{11}(\Delta x)$ відповідно. Це відбувається при досягненні вхідного сигналу функцій Δx значення Δx^1. Характеристики функцій-частин $f_1^1(\Delta x)$, $f_1^{11}(\Delta x)$ та $f_2^1(\Delta x)$, $f_2^{11}(\Delta x)$ однакові лише з тією різницею, що функції $f_1^{11}(\Delta x)$, $f_2^{11}(\Delta x)$ мають негативне значення. Структурна схема фільтра матиме вигляд представлений на рис. 6.

Запропонована вище методика дає змогу побудови фільтрів для систем вимірювання з різноманітними первинними перетворювачами (датчики струму, тензодатчики, термодатчики і т.д.).

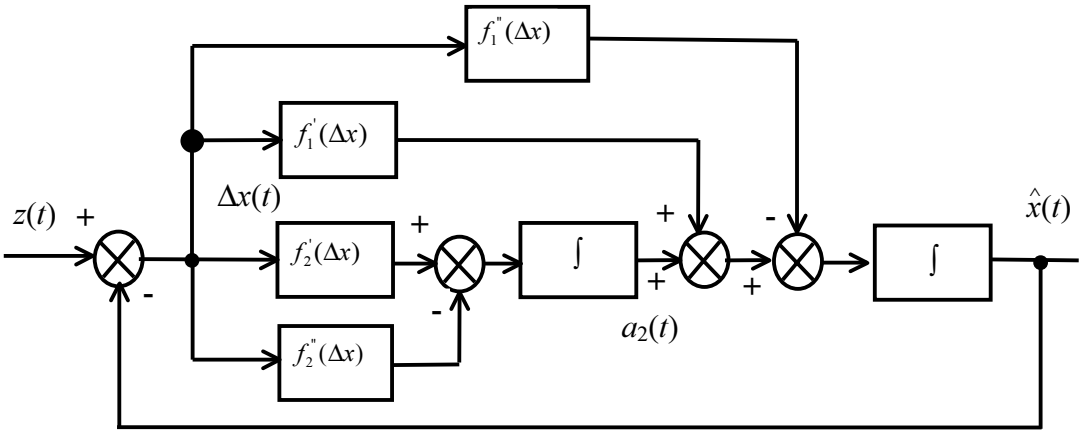


Рисунок 6 – Структурна схема фільтра при наявності в вхідному сигналі завади короткочасної дії великої амплітуди

При цьому, автоматизовані систем контролю та управління технологічним процесом, які побудовано з їх використанням, будуть мати покращені метрологічні властивості при невеликих матеріальних затратах.

Список літератури

1. Сидоренко В.В. Прикладная теория систем сопряжения измерительных преобразователей с управляющими микросредствами вычислительной техники для автоматизации сельскохозяйственных объектов: Автореферат на дис. д-ра. техн. наук: 05.13.07. – Кировоград, 1989. – 241 с.
2. Д.В.Калашнік Автоматизована система контролю та обліку зерна на підприємствах зернопереробної промисловості: Авторефрат на дис… к-та. техн. наук: 05.13.07 – Кіровоград, 1999. – 160 с.
3. Д.В.Калашнік Визначення параметрів пристроїв для вимірювання електричного сигналу тензометричних датчиків сили на підприємствах агропромислового комплексу // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. - Кіровоград: КДТУ. - 1999. - №27. - С. 177-182.

УДК 629.7.015.017.1

Д.К. Мещишен, Л.Г. Мещишена, доц., канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Вдосконалення математичної моделі процесу зміни залежності коефіцієнта піднімальної сили від кута атаки протягом тривалої експлуатації літака

У статті розглянуто питання вдосконалення запропонованої раніше математичної моделі зміни залежності коефіцієнта піднімальної сили від кута атаки $c_y = f(\alpha)$ протягом тривалої експлуатації повітряного судна. Розглянуте питання є складовою частиною розробки методики контролю аеродинамічного стану літака з метою вдосконалення діючих процедур підтримання льотної придатності
аеродинамічні характеристики, математична модель, число Re, аеродинамічна поверхня, ламінарний і турбулентний режими обтікання, льотна придатність

При вирішенні задачі відновлення реальних аеродинамічних характеристик літака, що перебуває в експлуатації протягом тривалого часу, у роботі [1] було запропоновано модель процесу зміни залежності коефіцієнта піднімальної сили літака від кута атаки $c_y = f(\alpha)$ у вигляді

$$c_{y2} = c_{y1} - \Delta c_y^{Cy} c_{y1} = c_{y1}(1 - \Delta c_y^{Cy}), \qquad (1)$$

де c_{y2}, c_{y1} - відповідно фактичне та типове значення коефіцієнта c_y;

Δc_y^{Cy} - параметр, що характеризує степінь зміни коефіцієнта c_y протягом тривалої експлуатації.

Відповідно до цієї моделі, зміна залежності $c_y = f(\alpha)$ протягом тривалої експлуатації літака відбувається таким чином, як це зображено на рисунку 1.

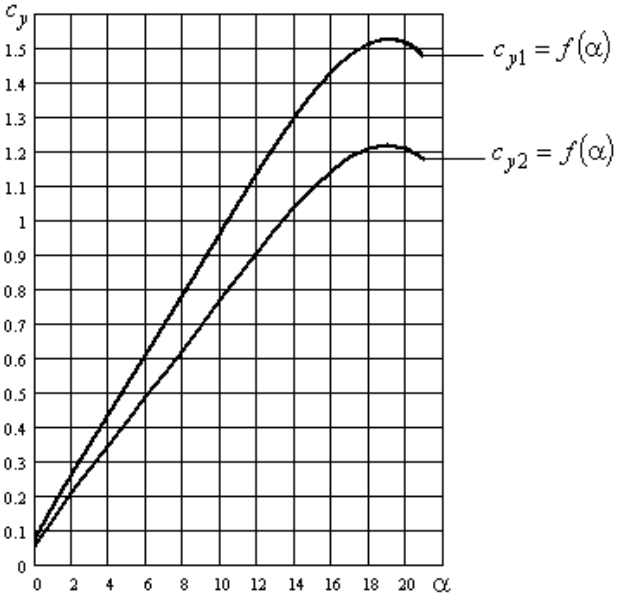


Рисунок 1 - Зміна залежності $c_y = f(\alpha)$ протягом тривалої експлуатації літака згідно запропонованої раніше моделі

© Д.К. Мещишен, Л.Г. Мещишена. 2004

Запропонована модель задовільно відображає зміну такого важливого параметру як коефіцієнт c_y. Але до недоліків моделі можна віднести відсутність відображення зміни критичного кута атаки $\alpha_{кр}$ - найбільш значимого з точки зору безпеки польотів параметра. Безперечно, що для вдосконалення запропонованої моделі треба також враховувати зміну цього параметра.

Видомо, що $c_{y\max}$ и $\alpha_{кр}$ залежать від геометричних характеристик крила та від числа Re

$$c_{y\max} = f\left(b, c, f, \eta, \lambda, x_c, x_f, \mathrm{Re}\right), \tag{2}$$

$$\alpha_{кр} = \varphi\left(b, c, f, \eta, \lambda, x_c, x_f, \mathrm{Re}\right), \tag{3}$$

де b - середня аеродинамічна хорда профілю крила;

c, f - відповідно найбільші товщина і кривина профілю крила;

η, λ - відповідно звуження та подовження крила;

x_c, x_f - відповідно координати найбільшої товщини і кривини профілю крила.

Оскільки нівелювальні характеристики планера значно не виходять за припустимі межі [1], то причиною змінювання $c_{y\max}$ і $\alpha_{кр}$ може бути тільки зміна режиму обтікання, тобто числа Re. Тому, залежності (2, 3) можна значно спростити

$$c_{y\max} = f\left(\mathrm{Re}\right), \tag{4}$$

$$\alpha_{кр} = \varphi\left(\mathrm{Re}\right). \tag{5}$$

Аналіз стану обшивки літака, що перебуває в експлуатації протягом тривалого часу, свідчить, що наслідком впливу багатьох експлуатаційних факторів є значне збільшення шорсткості аеродинамічних поверхонь. Характер зв'язку відносної шорсткості і критичного числа Re відображено за допомогою емпіричної формули $\mathrm{Re}_{кр} = \dfrac{2{,}88}{\left[\dfrac{h}{b}\right]^{0{,}63}}$, де h - середня висота мікронерівностей поверхні.

Результати контрольних вимірів шорсткості аеродинамічних поверхонь літака свідчать, що після 25-30 років експлуатації значення $\mathrm{Re}_{кр}$ зменьшується у 1,5-2,5 рази. А це приводить до відповідного зменшення координати точки переходу x_t ламінарного режиму обтікання до турбулентного на підставі відомої залежності

$$\mathrm{Re}_{кр} = \frac{V x_t}{\nu}, \tag{6}$$

де V - швидкість повітряного потоку;

ν - кінематична в'язкість повітря.

Зсув точки переходу ламінарного режиму течії до турбулентного приводить до загальної зміни режиму обтікання і більш ранішому відриву примежового шару. При існуванні турбулентного режиму обтікання місцезнаходження точки відриву примежового шару залежить від числа Re. Причиною цього, головним чином, є лінійна форма залежності між $\mathrm{Re}_{кр}$ і координатою точки переходу x_t. Отже, загальне погіршення режиму обтікання веде до початку відрива повітряного потоку на меньших кутах атаки, що веде до зменшення $\alpha_{кр}$ і $c_{y\max}$.

Зміна аеродинамічних характеристик літака при зледенінні є предметом пильної уваги вчених протягом тривалого часу. В останні роки дослідження у цієї області помітно зросли у зв'язку з розробкою бортових інтелектуальних систем боротьби зі зледенінням та пошуків вдосконалення роботи існуючих систем. Одним з предметів сучасних досліджень [2-5] є вивчення зміни залежності $c_y = f\left(\alpha\right)$ при зледенінні

обшивки. Для моделювання процесу зледеніння та для забезпечення подібності при проведенні експериментів, дослідники використовували профілі, котрі моделювали формування льоду, та наждаковий папір, які наклеювалися на аеродинамічні поверхні. У ході експериментів було досліджено вплив на змінювання залежності $c_y = f(\alpha)$ таких факторів, як форми профілю крила, числа M, числа Re, місцезнаходження і форма льодових формувань і шорсткість поверхні.

Метою роботи [4] було встановлення можливості розрахунку значення $\alpha_{кр}$ шляхом виміру фактичного значення коефіцієнту піднімальної сили на експлуатаційному куту атаки. Попередньо було показано, що між значеннями $\alpha_{кр}$ і $c_{y\max}$ існує лінійна залежність. Таким чином, у роботі [4] була запропонована наступна залежність

$$\alpha_{кр} = f(\Delta c_y) = f\left(c_{y1}^{\alpha=const} - c_{y2}^{\alpha=const}\right), \qquad (7)$$

де $c_{y1}^{\alpha=const}$, $c_{y2}^{\alpha=const}$ - відповідно значення c_y зледенілого та чистого крила при деякому експлуатаційному значенні α.

Але відомо, що вимір фактичного кута атаки є складним завданням і супроводжується значними помилками. Тому і на практиці підрахунок $\alpha_{кр}$ за формулою (7) неминуче буде супроводжуватися помилкою, що викликана помилкою виміру фактичного кута атаки.

Найбільш цікавими для вивчення впливу тривалої експлуатації літака на зміну залежності $c_y = f(\alpha)$ є результати дослідженнь [2-5], де було розглянуто вплив на цю залежність шорсткості аеродинамічної поверхні, яка може бути порівняна з шорсткістю обшивки літака, що експлуатується протягом тривалого часу. Аналіз впливу шорсткості на вид залежностей $c_y = f(\alpha)$, що наведені у роботах [2-5], наводить на думку, що значення $\alpha_{кр}$ залежить від значення c_y^{α}, тобто є його функцією. Кореляційний аналіз усіх наведених залежностей виявив, що коефіцієнт кореляції функції $\alpha_{кр} = f\left(c_y^{\alpha}\right)$ знаходиться в межах 0.93 – 0.98, що є гарним показником правомірності твердження про лінійний характер залежності $\alpha_{кр} = f\left(c_y^{\alpha}\right)$.

Отже, більш доцільним, з практичної точки зору, є підрахунок $\alpha_{кр}$ за допомогою коефіцієнта c_y^{α}, який може бути значно точніше підрахований в реальних умовах, зокрема за допомогою моделі (1). Використовуючи цю модель, легко показати, що коєфіцієнт c_y^{α} змінюється аналогічним чином, тобто $c_{y2}^{\alpha} = c_{y1}^{\alpha}\left(1 - \Delta c_y^{Cy}\right)$, де c_{y2}^{α}, c_{y1}^{α} - відповідно фактичне та типове значення коефіцієнта c_y^{α}.

Якщо підбити підсумок висновків щодо зміни залежності $c_y = f(\alpha)$ та висновків, наведених у роботі [1], то ми побачимо, що математична модель зміни цієї залежності у результаті тривалої експлуатації літака має вигляд

$$\begin{cases} c_{y2} = c_{y1}\left(1 - \Delta c_y^{Cy}\right) \\ c_{y2}^{\alpha} = c_{y1}^{\alpha}\left(1 - \Delta c_y^{Cy}\right) \\ \alpha_{кр2} = f\left(c_{y2}^{\alpha}\right) \\ c_{y\max 2} = f\left(\alpha_{кр2}\right) \end{cases}. \qquad (8)$$

Відповідно до вдосконаленої математичної моделі, зміна залежності $c_y = f(\alpha)$ протягом тривалої експлуатаціїї літака відбувається так, як це зображено на рисунку 2.

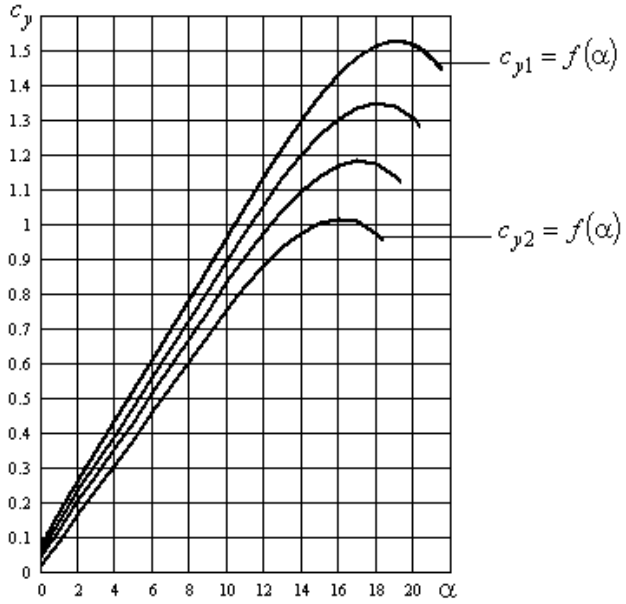


Рисунок 2 - Зміна залежності $c_y = f(\alpha)$ протягом тривалої експлуатації літака згідно вдосконаленої моделі

У результаті досліджень профілей ЦАГІ-С5-18 і ЦАГІ-СВ-13, з яких побудовано крило літаків Ан-24 і Ан-26, відносно котрих ведеться розробка методики контролю аеродинамічного стану, були отримані залежності $c_y = f(\alpha, \mathrm{Re})$, що дають можливість побудувати моделі $\alpha_{кр2} = f\left(c_{y2}^{\alpha}\right)$ і $c_{y\max 2} = f\left(\alpha_{кр2}\right)$ у вигляді відповідно

$$\alpha_{кр} = b_0 + b_1 c_{y2}^{\alpha}, \quad c_{y\max} = d_0 + d_1 \alpha_{кр2},$$

де b_0, b_1, d_0, d_1 – коефіцієнти регресії.

Таким чином, вдосконалена математична модель зміни аеродинамічних залежностей $c_y = f(\alpha)$ у ході тривалої експлуатації літака дозволює точніше розрахувати характеристики, на підставі яких обчислюється реальний діапазон експлуатаційних обмежень повітряного судна. Застосування запропонованої вдосконаленої моделі значно покращує об'єктивність висновків щодо льотної придатності екземпляра повітряного судна та можливості продовження сертифікату льотної придатності.

Список літератури

1. Білогузов В.С., Мещишен Д.К. Розробка математичної моделі процесу зміни аеродинамічних характеристик літака протягом тривалої експлуатації // Вісник Національного Авіаційного Университету. – Київ: НАУ. – 2001. Вип. 3(10). – С. 66 – 70.
2. Lee S., Kim H.S., Bragg M. B. "Investigation of Factors that Influence Iced - Airfoil Aerodynamics", AIAA Paper 2000-0099, Jan. 2000.
3. Broeren A.P., Addy H.E., Jr., Bragg, M.B. "Effect of Intercycle Ice Accretions on Airfoil Performance", AIAA Paper 2002-0240, Jan. 2002.
4. Hossain K.N., Sharma V., Bragg M.B., Voulgaris P.G. "Envelope Protection and Control Adaptation in Icing Encounters", AIAA Paper No. 2003 – 0025, Reno, NV, 2003.
5. Broeren A.P., Bragg M.B. "Effects of Airfoil Geometry on Performance with Simulated Ice Accretions", AIAA Paper No. 2003 – 6728, Reno, NV, 2003.

УДК 631.331

Д.Ю. Артеменко, С.І. Шмат, доц., канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Розробка нових конструкцій прикочуючих котків з використанням програмного комплексу COSMOSWorks

Важливу роль в процесі посіву насіння цукрових буряків відіграє прикочування висіяного насіння. Тому створення оптимальних умов для проростання насіння цукрових буряків залежить від характеру розподілення деформацій та напружень в зоні розвитку рослини, а також утворення над насіниною шару ґрунту потрібної щільності. Моделювати процес контакту прикочуючих котків з ґрунтом та отримувати епюри деформацій та напружень за допомогою ПК можливо використовуючи програмний комплекс COSMOSWorks. Цим питанням присвячена дана робота.
оптимальні умови, прикочуючий коток, моделювання процесу взаємодії котка з ґрунтом, епюри розподілення деформацій та напружень

Однією із основних вимог отримання високого врожаю цукрових буряків є забезпечення оптимального листового покрову для максимального отримання сонячної енергії, що визначається стрімкістю сходів після посіву та можливістю рослин вільно розвиватись.

Згідно з агротехнічними вимогами робочі органи посівної секції бурякової сівалки повинні утворювати оптимальні умови для проростання і розвитку висіяного насіння. Однією з технологічних операцій, які створюють вказані умови, є прикочування, тому від конструкції прикочуючого котка залежить не тільки якість розміщення насіння в борозні, але й стрімкість сходів. Конструкція прикочуючого котка вагомо впливає на характер розподілення питомих напружень та деформацій в зоні контакту з ґрунтом. Тому вивчення цих напружень та деформацій в ґрунті від дії прикочуючого котка є важливою складовою при розробці нових конструкцій котків.

В роботах [1,2,3] було зроблено висновок, що розподілення деформацій і напружень у ґрунті в основному залежить від конструктивних особливостей і матеріалу робочої частини прикочуючих робочих органів. На практиці отримання таких результатів вимагає проведення трудомісткого комплексу робіт.

В сучасних умовах, коли засоби для дослідження різних процесів набули високої досконалості, є сенс використання автоматизованих модулів і нових програмних продуктів для ПК. На сьогоднішній день фірма SolidWorks розробила програмний комплекс COSMOSWorks, який дає можливість досліджувати процес взаємодії фізичних тіл і отримувати результати експерименту без застосування трудоємких методів з достатньо високою точністю.

Для моделювання взаємодії прикочуючого котка з ґрунтом необхідно визначити умови і зробити припущення, які б могли максимально наблизити модель до реальних умов. Складовими частинами моделі є прикочуючий коток, ґрунт та діюче навантаження.

Оскільки програмний комплекс COSMOSWorks є складовою частиною програмного середовища SolidWorks, то складові частини моделі будуємо згідно реальних розмірів в 3D апараті даного середовища.

© Д.Ю. Артеменко, С.І. Шмат. 2004

Для побудови моделі прикочуючого котка, оснащеного шиною атмосферного тиску, використовуємо параметри і розміри серійного робочого органу бурякової сівалки СС-12В.

Розміри ділянки ґрунту, на якій буде відбуватися процес, вибираємо такими, щоб співвідношення між шириною прикочуючого котка і шириною ділянки незначно спотворювали процес деформації. Ширина ділянки перевищує в 10 разів ширину прикочуючого котка B=650 мм, довжина L=1000 мм, висота H=300 мм.

Для узгодження властивостей моделі ґрунту з розрахунковим апаратом програмного комплексу COSMOSWorks, ми робимо слідуючі припущення:

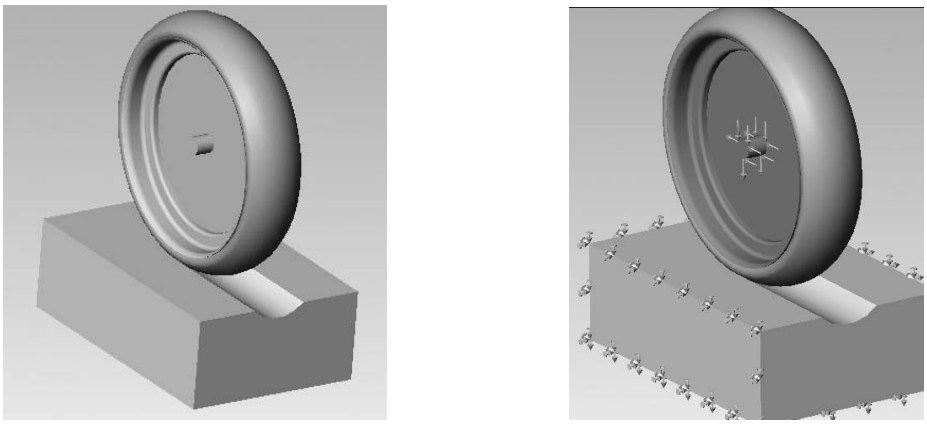
1. Дослідниками [2,3,4] було з'ясовано, що для ґрунтів залежність між деформаціями і напруженнями навіть при наближенні межі міцності – лінійна, тобто підлягає закону лінійних деформацій, тому ґрунт вважаємо лінійно – деформуючою напівплощиною. В свою чергу це приводить до слідуючих умов геометрії поверхні дільниці ґрунту (в двох взаємно-перпендикулярних площинах OX та OY):

$$f_2(X) = 0\,; \quad f_2(Y) = 0 \tag{1}$$

2. Припущення лінійності - виникаюча реакція прямо пропорційна прикладеним навантаженням.

3. Припущення пружності – при знятті навантажень елементи відновлюють свою вихідну форму (пластична деформація відсутня).

Після врахування вищенаведених умов і складання розрахункового модуля (рис. 1, а) отримуємо модель взаємодії котка з ґрунтом.



а) проект взаємодії котка з ґрунтом б) діючі навантаження та обмеження

Рисунок 1 – Етапи проектування моделі

До початку аналізу моделі необхідно задати навантаження, які діють на прикочуючий коток, враховуючи фізико-механічні властивості гуми та ґрунту, та величину розрахункових ділянок.

Оскільки навантаження, яке діє на прикочуючий коток, змінюється в залежності від умов посіву, то для розрахунку необхідно визначити якесь конкретне його значення. Приймаємо максимальне навантаження, яке може діяти на прикочуючий коток, рівним 200 Н.

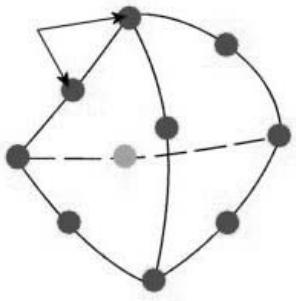
Фізико-механічні властивості складових частин прикочуючого котка, а також властивості ґрунту (суглинистий чорнозем) наведені в літературі [5,6] і зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості елементів, що входять до складу моделі

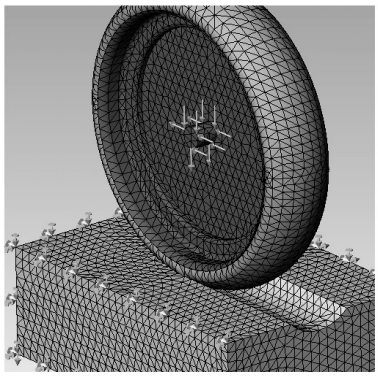
Фізико-механічні властивості елементів, що входять до складу моделі	Грунт	Гума	Метал	Одиниці виміру приведені до стандартів ISO
Модуль пружності	$6 \cdot 10^7$	$6{,}1 \cdot 10^6$	$2{,}1 \cdot 10^{11}$	Н/м^2
Коефіцієнт Пуассона	0,34	0,49	0,28	-
Модуль зсуву	$10 \cdot 10^3$	$2{,}9 \cdot 10^6$	$7{,}9 \cdot 10^{10}$	Н/м^2
Масова щільність	1100	1000	7800	кг/м^3
Межа міцності на розтяг	$5 \cdot 10^3$	$1{,}4 \cdot 10^7$	$3{,}9 \cdot 10^8$	Н/м^2
Межа міцності на стиск	$7 \cdot 10^4$	-	-	Н/м^2
Межа текучості	-	$9{,}2 \cdot 10^6$	$2{,}2 \cdot 10^8$	Н/м^2

Прикладаючи зусилля і навантаження, які діють на прикочуючий коток, а також враховуючи властивості взаємодіючих матеріалів, отримуємо розрахунковий проект взаємодії котка з ґрунтом (рис. 1б).

В процесі проектування моделі для аналізу програмний комплекс COSMOSWorks [7] використовує емісійну мікроскопію, яка розділяє її на декілька простих чотирьохгранних форм, які називаються елементами. Ці елементи мають загальні точки, які називаються вузлами. Типова форма (елемент) показана на рис.2а.



а) елемент розбивки



б) сформована розрахункова сітка

Рисунок 2 – Розбивка моделі на елементи

Точки позначають вузли елемента, елемент може мати зігнуті або прямі кромки. У кожного вузла є три невідомі переміщення в напрямку трьох осей. Процес поділу деталі на прості форми (елементи) формує сітку. Розміри реальних елементів в різних місцях моделі можуть відрізнятися в залежності від геометрії. Для більш якісного аналізу ми використовуємо мінімальний розмір елемента. Процес формування сітки показаний на рис.2б.

В результаті аналізу програмним комплексом COSMOSWorks розрахункової сітки ми отримуємо епюри розподілення деформацій в зоні контакту прикочуючого котка з ґрунтом. Епюри деформацій наведені на рис. 3.

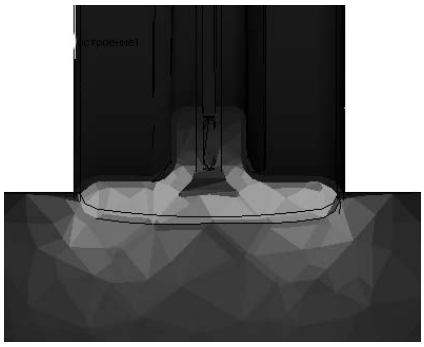
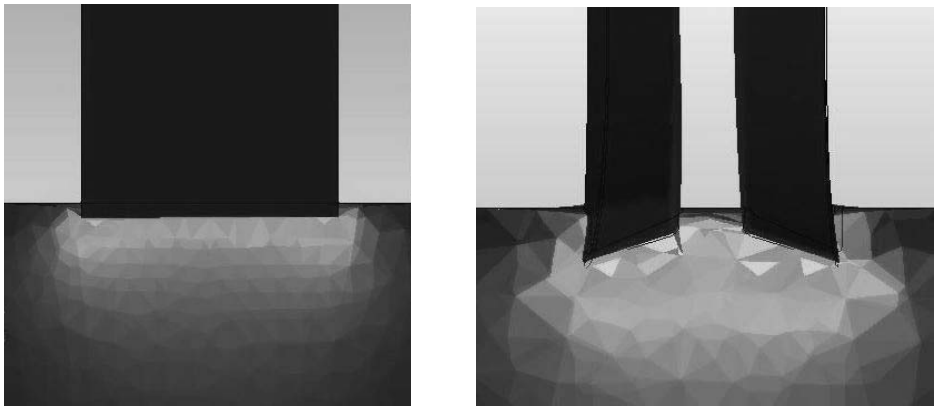


Рисунок 3 – Розподілення деформацій під прикочуючим котком сівалки ССТ-12В

Ми провели також аналіз ситуації, яка виникає під прикочуючими котками інших бурякових сівалок (Nodet Gougis, Monocentra ”SP”). Епюри деформацій показані на рис. 4



а) гладкого металевого б) конусного металевого

Рисунок 4 – Епюри деформацій під котками різних конструкцій

Наведені епюри та їх розрахунки показують, що серійні вітчизняні та зарубіжні прикочуючі котки не задовольняють вимогам агротехніки по створенню оптимальних умов в зоні розміщення насіння. А саме: утворюють безпосередньо над насінням ущільнену ділянку ґрунту, яка негативно впливає на стрімкість проростання та швидкість появи сходів. Сповільнення появи рослин цукрових буряків на денній поверхні на 2-3 дні при несприятливих умовах посушливої весни приводить до зменшення врожаю на 5-8%. Тому є необхідність створення нового прикочуючого котка, який би зміг ущільнювати ґрунт навколо насінини, залишаючи над ним шар ґрунту потрібної щільності, що давало б змогу вільно розвиватись проростаючим сходам.

Для реалізації поставленої задачі ми спроектували поверхню робочого органа яка б могла задовольнити вказані вимоги через рівняння (2).

$$Y_1 = f_1(x) = \begin{cases} y_0 - R_1 + \sqrt{R_1^2 - x^2} & 0 \le x \le R_1 \\ y_0 - R_1 + \dfrac{y_1 - y_0 + R_1}{x_1 - R_1}(x - R_1) & R_1 < x \le x_1 \\ R_2 - \sqrt{R_2^2 - (x - x_2)^2} & x_1 < x \le x_3 \\ y_4 - \sqrt{R_3^2 - (x - x_4)^2} & x_3 < x \le x_5 \end{cases} \quad (2)$$

Ці рівняння представляють собою конфігурацію робочої поверхні котка. Правильний вибір параметрів рівняння дає можливість оптимізувати конструкцію котка відносно вимогам по ущільненню ґрунту в межах рядка, а також дає можливість проектувати оптимальні розміри робочої поверхні. На рис.5 показана експериментальна крива необхідна для проектування робочої поверхні нового прикочую чого котка.

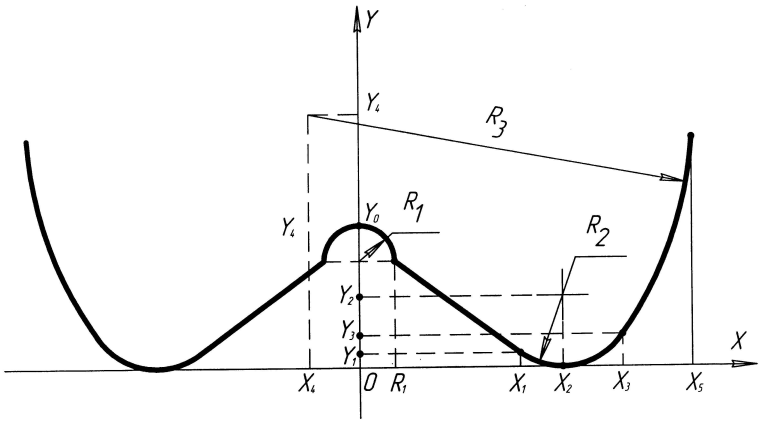


Рисунок 5 – Експериментальна крива нового робочого органа

Проведений аналіз епюр прикочуючих котків показав, що глибина деформацій і щільність ґрунту під котками з металевою основою більші ніж під котком, оснащеним шиною атмосферного тиску, тому необхідно при розробці нової конструкції спиратися на переваги шини атмосферного тиску.

Для виконання вимог агротехніки щодо забезпечення неущільненої ділянки ґрунту над насінням в запропонованій конструкції прикочуючого котка використовуємо шину атмосферного тиску *V* – подібного профілю, в поперечному перерізі шина має робочий профіль, товщина стінок якого рівномірно зменшується від периферії до середини шини [8]. Для компенсації деформації шини при переміщенні колеса по ґрунту, а також для розміщення ґрунту, який згруджується в центрі рядка, посередині шини виконана впадина радіальної форми. Розроблений робочий орган показаний на рис.6.

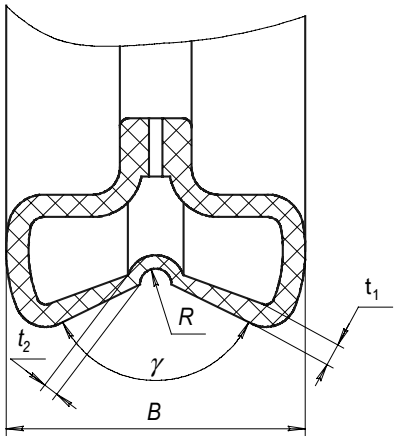


Рисунок 6 – Експериментальна шина атмосферного тиску для прикочуючого котка

Після побудови шини експериментального зразка необхідно отримати параметри оптимізації та провести розробку і аналіз дії нового робочого органа на ґрунт, а також отримати епюри розподілу напружень та деформацій під ним.

Параметрами оптимізації для вказаної конфігурації прикочуючого органа будуть:

B – ширина котка;

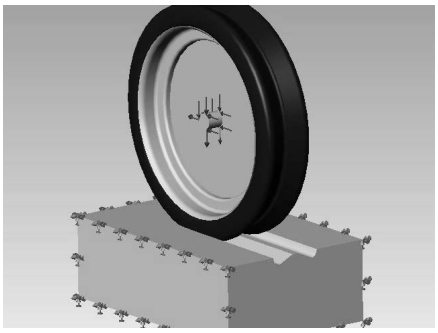
t_1 – товщина котка в нижній частині обода;

t_2 – товщина котка в верхній частині обода;

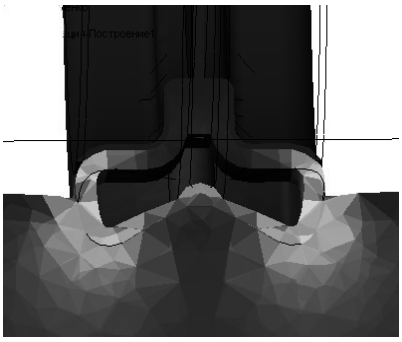
R – радіус впадини;

γ – кут між конічними поверхнями шини.

Користуючись вищенаведеним прикладом розробки моделей в програмному середовищі COSMOSWorks отримали модель (рис. 7а) і результати аналізу експериментального прикочуючого котка (рис. 7б).



а) розрахункова модель



б) результат аналізу

Рисунок 7 – Результати моделювання нового робочого органа

Експериментальні дослідження розробленої моделі прикочуючого котка дали можливість з’ясувати закономірність розподілення деформацій в залежності від конструктивних особливостей робочого органа, а також з’ясувати із вищенаведеної епюри, що деформації розподіляються по обидва боки від насіння, причому над насінням залишається шар, в якому спостерігається мінімальна деформація. Тобто ґрунт в зоні росту експериментальний коток ущільнює найменше, що задовольняє вимогам агротехніки.

Список літератури

1. Соколова В.А. Исследование распределения напряжений в контакте колеса с опорной поверхностью. Труды НАМИ, вып.54. 1962. С. 40-67.
2. Шевелев В.И. Исследование процесса прикатывания почвы при посеве сельскохозяйственных культур: Автореф. дис….канд. техн. наук. – Кишинёв, 1969. – 25 с.
3. Рожков П.Н. Исследование процесса взаимодействия гладких катков с почвой и обоснование их формы: Автореф. дис….канд. техн. наук. – Харьков, 1975. – 27 с.
4. Кушнарев А.С., Кочев В.И. Механико – технологические основы обработки почвы. – К.: Урожай, 1989. – 144 с.
5. Механіко – технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів/ Г.А. Хайліс, А.Ю. Горбів, З.О. Гошко, М.М. Ковальов, О.О. Налобіна, С.Ф. Юхимчик. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 1998. – 268 с.
6. Механіко – технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Підручник / О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк, В.М. Швайко та ін.; За ред. С.С. Яцуна. – К.: Мета, 2003. – 448 с.
7. Introducing COSMOSWorks 2003.-186 с. // www.cosmosm.com.
8. Шмат С.І., Артеменко Д.Ю., Педюра М.М. Прикочуюче колесо сівалки. Пат. України № 67554, бюл. № 4 від 15.06.04.

УДК 62-752: 62-755

Г.Б. Філімоніхін, доц., канд. фіз.-мат. наук, Ю.А. Невдаха, канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Зміна габаритних розмірів автобалансуючого пристрою при зміні кількості корегуючих вантажів

Досліджується зміна габаритих розмірів автобалансуючого пристрою (АБП) при зміні кількості корегуючих вантажів (КВ) чутливого до сил ваги, на два корегуючі вантажі нечутливих до сил.
автобалансир, некласичний автобалансир, корегуючий вантаж, зрівноваження.

В роторних машинах, з вертикально розташованим ротором, центрифугах, екстракторах, сепараторах і т.п які під час експлуатації, завантажуються сировиною, яка нерівномірно розподіляється усередині ротора виникають дисбаланси. Тому такі ротори треба зрівноважувати на ходу під час виконання ними технологічних функцій, бо дисбаланс в таких машинах змінюється з часом. З цією метою використовуються некласичні АБП з твердими КВ які досліджені в роботах.[1, 2, 3] Вони відрізняються простотою конструкції і надійністю роботи і призначені для балансування роторів на закритичних швидкостях обертання.

В запропонованих АБП заміна одного КВ на два дещо збільшує габаритні розміри пристрою. Дослідимо ці зміни за умовами, що АБП - прототип і АБП з в'язями утворені КВ – напівсегментами і мають однакову балансувальну ємність.

Нехай в АБП - прототипі КВ – напівсегмент під час руху не може виходити зі сфери, діаметра d з центром у нерухомій точці на осі вала ротора (рис.1). Знайдемо, при якому співвідношенні між радіусом напівциліндра R і його товщиною h КВ буде мати найбільшу балансувальну ємність. З рис.1 видно, що

$$h = 2r\sin\alpha, \quad R = r\cos\alpha, \tag{1}$$

де $\alpha \in (0,\pi/2)$ - кут, який розглядається як параметр, що визначає співвідношення між параметрами R і h. Балансувальну ємність одного КВ $S = 2R^3h\gamma/3$

$$S(\alpha) = \frac{4}{3}r^4\cos^3\alpha\sin\alpha. \tag{2}$$

Визначаємо $S'(\alpha)$ і прирівнюємо похідну до нуля, отримуємо

$$S'(\alpha) = \frac{4}{3}r^4(\cos^2\alpha - 3\sin^2\alpha)\cos^2\alpha = 0. \tag{3}$$

Рівняння (3) з точністю до кількості коренів еквівалентно таким рівнянням

$$\cos\alpha = 0, \quad \operatorname{tg}\alpha = 1/\sqrt{3}, \quad \operatorname{tg}\alpha = -1/\sqrt{3}. \tag{4}$$

Система (4) допускає такі істотно відмінні розв'язки

$$\alpha = \pi/2, \quad \alpha = \pi/6. \tag{5}$$

З рівності (2) видно, що куту $\pi/2$ відповідає мінімум, а куту $\pi/6$ - максимум балансувальної ємності КВ, причому

$$S_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{4}\gamma r^4. \tag{6}$$

Надалі приймаємо, що у АБП - прототипі використовується КВ напівсегмент, у якого $\alpha = \pi/6$ - найбільша балансувальна ємність. Дослідимо, як зміняться габаритні розміри АБП від заміни одного КВ на два, при незмінній балансувальній ємності двох пристроїв. Розглядаємо три способи заміни одного КВ на два.

© Г.Б. Філімоніхін, Ю.А. Невдаха. 2004

1. Висота АБП - прототипу і АБП з в’язями однакова (рис. 1, А, В):

$$H = \sqrt{3}r\,. \tag{7}$$

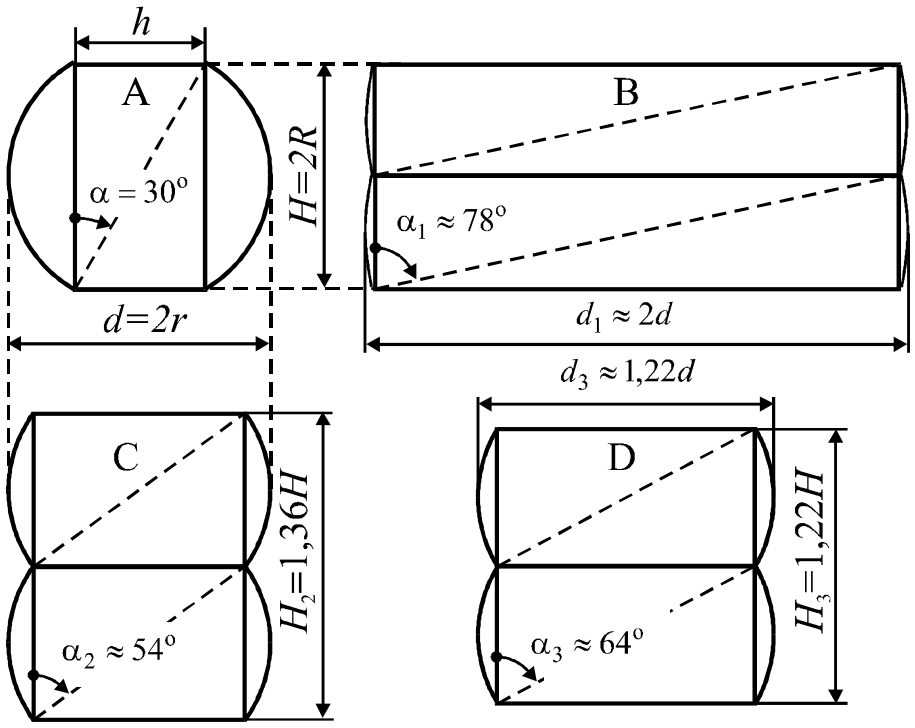
З врахуванням, що у пристроїв однакова балансувальна ємність, маємо

$$2 \cdot \frac{4}{3}\gamma r_1^4 \cos^3\alpha_1 \sin\alpha_1 = \frac{\sqrt{3}}{4}\gamma r^4\,. \tag{8}$$

З врахуванням, що у пристроїв однакова висота, маємо

$$H = \sqrt{3}r = 4r_1 \cos\alpha_1\,. \tag{9}$$

З системи рівнянь (8), (9) знаходимо



А - вихідний КВ; В - однакова висота;
С - однакова ширина; D - пропорційне збільшення розмірів.

Рисунок 1 – Заміна КВ на два аналогічних при незмінній балансувальній ємності

$$\alpha_1 \approx 78^0, \quad r_1 \approx 2r\,. \tag{10}$$

З цього випливає, що ширина (горизонтальні габаритні розміри) АБП збільшиться майже у два рази.

2. Ширина (горизонтальні габаритні розміри) АБП - прототипу і АБП з в’язями однакова (рис. 1, А, С):

$$r_2 = r\,. \tag{11}$$

З врахуванням, що у пристроїв однакова балансувальна ємність, маємо

$$2 \cdot \frac{4}{3}\gamma r_2^4 \cos^3\alpha_2 \sin\alpha_2 = \frac{\sqrt{3}}{4}\gamma r^4\,. \tag{12}$$

З врахуванням, що у пристроїв однакова ширина, маємо таке рівняння, для визначення α_2:

$$\cos^3\alpha_2 \sin\alpha_2 = \frac{3\sqrt{3}}{32}\,. \tag{13}$$

З нього знаходимо

$$\alpha_2 \approx 54^0 . \tag{14}$$

Висота пристрою складе

$$H_2 = 4r_2 \cos\alpha_2 \approx 2{,}35r . \tag{15}$$

При цьому висота збільшиться у 1,36 рази:

$$\eta = H_2 / H \approx 2{,}35r / \sqrt{3}r \approx 1{,}36 . \tag{16}$$

3. Габаритні розміри АБП - прототипу збільшуються пропорційно у k разів (рис. 1, A, D):

$$H_3 = k\sqrt{3}r, \quad r_3 = kr . \tag{17}$$

З врахуванням, що у пристроїв однакова балансувальна ємність, маємо

$$2 \cdot \frac{4}{3}\gamma r_3^4 \cos^3\alpha_3 \sin\alpha_3 = \frac{\sqrt{3}}{4}\gamma r^4 . \tag{18}$$

З врахуванням (17) з (18) отримуємо таке рівняння:

$$k^4 \cos^3\alpha_3 \sin\alpha_3 = \frac{3\sqrt{3}}{32} . \tag{19}$$

З рис.1, D знаходимо

$$4r_3 \cos\alpha_3 = k\sqrt{3}r . \tag{20}$$

З врахуванням (17) з (20) отримуємо таке рівняння для визначення α_3:

$$\cos\alpha_3 = \sqrt{3}/4 . \tag{21}$$

Звідки знаходимо

$$\alpha_3 \approx 64^0 . \tag{22}$$

З рівняння (19) знаходимо, що габаритні розміри збільшаться у

$$k \approx 1{,}22 \tag{23}$$

разів.

Отримані дані дають змогу зробити висновок, що при незміній висоті КВ у АБП – прототипа, ширина КВ у АБП з зв´язями збільшиться у 2 рази; при незміній ширині КВ у АБП – прототипа, висота КВ у АБП з зв´язями збільшиться у 1.36 рази; при пропорційній зміні розмірів КВ у АБП з зв´язями габаритні розміри збільшаться у 1.22 рази.

Список літератури

1. Филимонихин Г.Б. Условия уравновешивания ротора абсолютно твердым телом с неподвижной точкой на оси вала // Доп. НАН України. - 2001. - № 1. - С. 65-69.
2. Филимонихин Г.Б., Невдаха Ю.А. Установившиеся движения ротора, уравновешиваемого связанными корректирующими грузами с неподвижными точками на оси вала ротора // Вестник НТУУ “КПИ”, серия “Машиностроение”, 2000. Вип. №39, С. 102-110.
3. Филимонихин Г.Б., Невдаха Ю.А. Уравновешивание ротора, совершающего плоскопараллельное движение, двумя связанными абсолютно твердыми телами с неподвижными точками на оси вала ротора // Прикладная механика. – 2002. - 38, №3. - С. 135-144.

УДК 62-752+62-755

М.І. Бобир, проф., д-р техн. наук
Національний технічний університет України "КПІ"
Г.Б. Філімоніхін, доц., канд. фіз.-мат. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Інженерні умови зрівноваження роторів у рамках різних плоских моделей

Для плоских моделей ротора на анізотропних і ізотропних в'язко-пружних опорах, за допомогою інженерного критерію настання автобалансування досліджений вплив сил в'язкого опору в опорах на критичні швидкості системи ротор-автобалансир (при переході через які настає, чи втрачається автобалансування). Для різних плоских моделей ротора з приєднаними тілами (коригувальними вантажами, дисбалансом, корпусом), за допомогою інженерного критерію стійкості основних рухів, знайдені критичні швидкості. Встановлено правило, яке дозволяє для визначення критичних швидкостей у випадку ротора з приєднаними тілами використовувати аналогічні формули для ротора без приєднаних тіл.

ротор, автобалансир, дисбаланс, балансування, критична швидкість

Пасивні автобалансири (АБП) застосовуються для зрівноваження на ходу роторів, чий дисбаланс змінюється у процесі експлуатації, зокрема для зрівноваження: абразивних кругів шліфувальних (полірувальних) верстатів та ручних шліфувальних машин; CD/DVD дисків; барабанів екстракторів, центрифуг, сепараторів; автомобільних і авіаколіс; колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання; роторів електродвигунів; лопастей вентиляторів, тощо [1-5]. Для працездатності пристроїв необхідно, щоб на робочих швидкостях обертання ротора їх коригувальні вантажі (КВ) самі приходили у положення, у якому зрівноважують ротор. У монографії [5] для різних плоских моделей ротора, без врахування сил в'язкого опору в опорах, із застосуванням інженерного критерію настання автобалансування були наближено визначені критичні швидкості – при переході через які настає, чи втрачається автобалансування. Ці швидкості придатні для будь-якого АБП за умови, що маса КВ набагато менша маси ротора і малі сили опору в опорах. Якщо це не так, то критичні швидкості доцільно уточнювати. В цієї роботі досліджується вплив сил в'язкого опору в опорах на критичні швидкості ротора на анізотропних і ізотропних в'язко-пружних опорах, коли ротор здійснює плоский рух. Також, для різних плоских моделей ротора визначаються критичні швидкості системи ротор-АБП із врахуванням мас АБП, дисбалансу і деякого тіла (корпусу), у яке встановлений ротор і яке рухається разом з ротором плоскопаралельно. Для цього використовуються два інженерних критерії, сформульовані у монографії [5].

Дослідимо вплив в'язкості опор на критичні швидкості ротора, у випадку, коли ротор здійснює плоский рух.

На рис. 1 показані схеми, що пояснюють закріплення і рух ротора на анізотропних пружних (рис. 1, а), і в'язко-пружних (рис. 1, б) опорах. Нерухомі осі X, Y спрямовані по головним напрямкам для жорсткостей опор, причому так, що вісь X - вздовж мінімальної, а Y - максимальної жорсткості (рис. 1, в). Рух ротора визначаємо як суму двох рухів (рис. 1, г): поступального – разом з центром мас – точкою C; обертального – навколо центра мас із сталою кутовою швидкістю ω. Положення центра мас ротора визначають координати x, y. Вектор дисбалансу $\vec{s}$ утворюється

© М.І. Бобир, Г.Б. Філімоніхін. 2004

елементарною масою dm, яка у початковий момент часу знаходилася на осі X. Поточний напрям вектора дисбалансу визначається кутом ωt між вектором і віссю X.

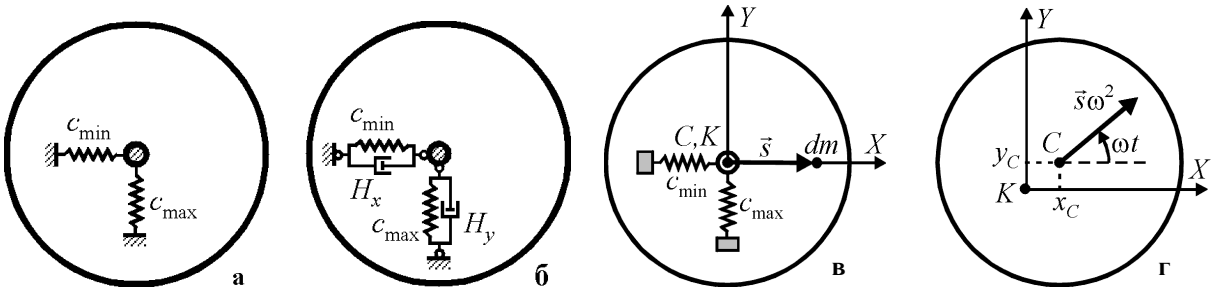


Рисунок 1 - Схема плоского ротора на анізотропних опорах

Диференціальні рівняння руху ротора на анізотропних в'язко-пружних опорах (рис. 1, б) мають вигляд

$$M\ddot{x} + H_x x + c_{\min} x = s\omega^2 \cos\omega t, \quad M\ddot{y} + H_y y + c_{\max} y = s\omega^2 \sin\omega t, \tag{1}$$

де H_x, H_y - коефіцієнти в'язкого опору в опорах. Подамо ці рівняння у вигляді

$$\ddot{x} + h_x x + \omega_{\min}^2 x = \tilde{s}\omega^2 \cos\omega t, \quad \ddot{y} + h_y y + \omega_{\max}^2 y = \tilde{s}\omega^2 \sin\omega t, \tag{2}$$

де

$$\omega_{\min} = \sqrt{c_{\min}/M},\ \omega_{\max} = \sqrt{c_{\max}/M},\ h_x = H_x/M,\ h_y = H_y/M,\ \tilde{s} = s/M,\ \tilde{s} << 1. \tag{3}$$

Розв'язок цієї системи має декілька складових. Але за наявністю навіть невеликих сил опору всі вони прямують до нуля за виключенням частинного розв'язку цієї системи. Саме ця складова і буде визначати відхилення вала, коли рух установиться. Частинний розв'язок має вигляд

$$x = K\cos\omega t + L\sin\omega t, \quad y = M\cos\omega t + N\sin\omega t, \tag{4}$$

де

$$K = \tilde{s}\omega^2(\omega_{\min}^2 - \omega^2)/\Delta_x,\ L = \tilde{s}\omega^2\omega h_x/\Delta_x,$$
$$M = \tilde{s}\omega^2(\omega_{\max}^2 - \omega^2)/\Delta_y,\ N = -\tilde{s}\omega^2\omega h_y/\Delta_y,$$
$$\Delta_x = (\omega_{\min}^2 - \omega^2)^2 + h_x^2\omega^2 > 0,\ \Delta_y = (\omega_{\max}^2 - \omega^2)^2 + h_y^2\omega^2 > 0. \tag{5}$$

Застосуємо до розглядуваної системи інженерний критерій настання авто-балансування [5]:

для усунення пасивним АБП з твердими КВ відхилення деякої точки поздовжньої осі ротора від осі обертання, чи для зменшення цього відхилення рідинним АБП необхідно і достатньо, щоб ця точка під дією дисбалансу, у ній прикладеного, у середньому за один оберт ротора, відхилялася протилежно вектору дисбалансу.

Математично критерій можна записати так

$$\bar{r}_{Ac} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\vec{c}(\varphi)\cdot\vec{r}_A(\varphi)d\varphi = \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega}\vec{c}(t)\cdot\vec{r}_A(t)dt < 0, \tag{6}$$

де φ - кут повороту ротора; t – час;

ω - стала кутова швидкість обертання ротора;

$\vec{c}$ - одиничний вектор, спрямований по вектору дисбалансу, як функція $\varphi(t)$;

$\vec{r}_A$ - вектор відхилення точки A вала від осі обертання, викликаний статичним дисбалансом, прикладеним у точці A, як функція $\varphi(t)$.

Для визначення відповідних умов введемо у розглядання одиничний вектор, спрямований у напрямку вектора дисбалансу. Тоді його проекції на осі X, Y:

$$\epsilon_x = \cos\omega t,\ \epsilon_y = \sin\omega t. \tag{7}$$

Проекція вектора відхилення вала на напрям дисбалансу визначатиметься:

$$r_{Cє} = K\cos^2\omega t + M\sin^2\omega t + (L+N)\cos\omega t\sin\omega t\,. \tag{8}$$

Вал більшу частину часу буде знаходитися з легкого боку ротора за умови, що

$$\bar{r}_{Cє} = \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} r_{Cє}(t)dt = (K+M)/2 < 0\,. \tag{9}$$

Подамо $\bar{r}_{Cє}$ у вигляді

$$\bar{r}_{Cє}(\omega) = \frac{\tilde{s}\omega^2\{2(\omega_1^2-\omega^2)(\omega_2^2-\omega^2)(\omega_3^2-\omega^2)+\omega^2[h_x^2(\omega_3^2-\omega^2)+h_y^2(\omega_1^2-\omega^2)]\}}{2\Delta_x\Delta_y} < 0\,. \tag{10}$$

де

$$\omega_1 = \omega_{\min},\ \omega_2 = \sqrt{(\omega_{\min}^2+\omega_{\max}^2)/2},\ \omega_3 = \omega_{\max},\ \omega_1 < \omega_2 < \omega_3\,. \tag{11}$$

За відсутністю сил в'язкого опору в опорах (рис. 1, а)

$$\bar{r}_{Cє} = \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega} r_{Cє}(t)dt = \frac{\tilde{s}\omega^2[\omega_2^2-\omega^2]}{2(\omega_1^2-\omega^2)(\omega_3^2-\omega^2)} < 0\,. \tag{12}$$

Видно, що існують три критичні швидкості з (11), і автобалансування може відбуватися на швидкостях між першою і другою, та над третьою критичними швидкостями:

$$\omega \in (\omega_1,\omega_2)\bigcup(\omega_3,+\infty)\,. \tag{13}$$

Цей результат був знайдений в роботі [5]. Зауважимо, що ω_1,ω_3 - це критичні швидкості обертання ротора, а ω_2 - це деяка додаткова критична швидкість, яка виникає завдяки АБП і знаходиться між критичними швидкостями обертання ротора.

Врахуємо сили в'язкого опору в опорах. З (10) видно, що

$$\forall\,\omega\in(0,\omega_1)\quad \bar{r}_{Cє}(\omega) > 0,\quad \forall\,\omega > \omega_3\quad \bar{r}_{Cє}(\omega) < 0\,. \tag{14}$$

Тому, якщо сили опору такі, що критичних швидкостей три - $\tilde{\omega}_{1,2,3}$, то

$$\omega_1 < \tilde{\omega}_1 < \tilde{\omega}_2 < \tilde{\omega}_3 < \omega_3\,, \tag{15}$$

якщо сили опору такі, що критична швидкість одна - $\tilde{\omega}_1$, то

$$\tilde{\omega}_1 < \omega_3\,. \tag{16}$$

Якщо сили в'язкого опору малі

$$h_x \sim \varepsilon,\quad h_y \sim \varepsilon,\quad \varepsilon << 1\,, \tag{17}$$

то критичних швидкостей три і вони визначаються такими наближеними формулами

$$\tilde{\omega}_1^2 \approx \omega_1^2[1+h_x^2/(\omega_3^2-\omega_1^2)],\ \tilde{\omega}_2^2 \approx \omega_2^2[1+(h_x^2-h_y^2)/(\omega_3^2-\omega_1^2)]$$
$$\tilde{\omega}_3^2 \approx \omega_3^2[1-h_y^2/(\omega_3^2-\omega_1^2)]\,. \tag{18}$$

Можна перевірити, що тільки у випадку великих сил в'язкого опору ($h_x, h_y >> 1$) і при певному співвідношенні між ними система має одну критичну швидкість. Оскільки такий випадок на практиці важко реалізувати, то ми не будемо його розглядати.

Якщо в'язко-пружні опори ізотропні, то

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_0,\quad h_x = h_y = h,\ \Delta_x = \Delta_y = (\omega^2-\omega_0^2)^2 + h^2\omega^2$$

і умова (10) приймає вигляд

$$\bar{r}_{Cє}(\omega) = \tilde{s}\omega^2(\omega_0^2-\omega^2)\big/[(\omega^2-\omega_0^2)^2+h^2\omega^2] < 0\,. \tag{19}$$

Звідки видно, що існує єдина критична швидкість ω_0, яка співпадає із критичною швидкістю обертання ротора, при перевищенні якої настає автобаласування.

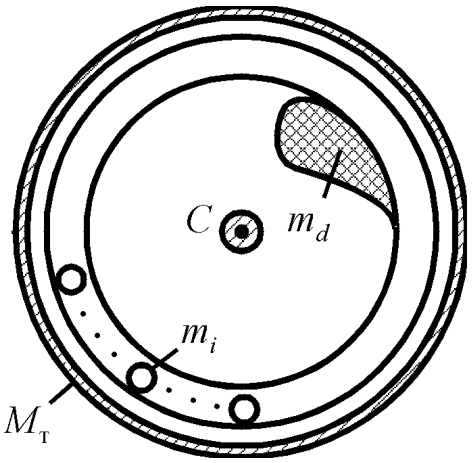
Знайдемо для різних плоских моделей ротора критичні швидкості системи ротор-АБП із застосуванням інженерного критерію стійкості основного руху, який має таке формулювання [5]:

для стійкості основного руху системи ротор-АБП необхідно і достатньо, щоб точка А на повздовжній осі ротора, яка знаходиться у площині корекції АБП, під дією елементарного дисбалансу, викликаного відхиленням КВ чи КМ від основного руху, відхилялася від основного руху у середньому за один оберт ротора, протилежно вектору елементарного дисбалансу:

$$\vec{r}_{Ac} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\vec{e}(\varphi)\cdot\Delta\vec{r}_A(\varphi)d\varphi = \frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi/\omega}\vec{e}(t)\cdot\Delta\vec{r}_A(t)dt < 0\,, \qquad (20)$$

де $\Delta\vec{r}_A$ - відхилення у русі точки A від закону $\vec{r}_A$, викликане елементарним дисбалансом.

Нехай з ротором рухаються: КВ сумарною масою Σm_i; дисбаланс, масою m_d; деяке тіло, наприклад корпус, масою $M_т$ (рис. 2). На відміну від попередніх моделей до опор кріпіться корпус, а не ротор. У основному русі КВ зрівноважують дисбаланс, тому центр мас ротора з дисбалансом і КВ знаходиться у точці C. При елементарному відхиленні КВ від основного руху виникає елементарний дисбаланс. Не обмежуючі загальності можна вважати, що КВ залишаються у вихідному положенні, а елементарний дисбаланс, як і раніше, утворюється елементарною масою dm.



Зауважимо, що розглянуті вище диференціальні рівняння плоского руху ротора – це рівняння поступального руху ротора разом з центром мас. Тому ці рівняння зміняться наступним чином: в них замість маси ротора M буде стояти сумарна маса ротора і тіл, що з ним рухаються

$$M_\Sigma = M + M_т + \Sigma m_i + m_d\,. \qquad (21)$$

Решта у рівняннях не зміниться. Тому кількість і вигляд критичних швидкостей, знайдених вище не зміниться. Але у рівняння для їх визначення треба підставляти замість маси ротора M сумарну масу M_Σ.

Якщо АБП – рідинний, або комбінований, то у випадку роторів на ізотропних опорах вигляд і кількість критичних швидкостей також не зміниться, тільки в сумарну масу буде входити маса рідини. Якщо опори неізотропні, то рух рідини в середині АБП – невстановившийся. Проте для наближеного визначення критичних швидкостей і в цьому випадку можна застосовувати згадані формули, підставивши в них замість маси ротора M сумарну масу M_Σ.

Отже маємо таке **правило врахування приєднаних тіл, які рухаються з ротором**: *при складанні диференціальних рівнянь руху системи, чи при визначенні критичних швидкостей, для врахування приєднаних тіл, які рухаються з ротором треба підставити у відповідні рівняння, одержані без врахування цих тіл, замість маси ротора – сумарну масу ротора і всіх тіл, що з ним рухаються.*

Застосовуємо це правило до різних плоских моделей ротора. Для роторів, розглянутих вище одержимо наступне.

1. Ротор з приєднаними тілами, корпус якого встановлений на анізотропні опори, при нехтуванні силами в'язкого опору в опорах, має три критичні швидкості, які визначаються формулами (11), причому в них

$$\omega_{\min} = \sqrt{c_{\min} / M_\Sigma}, \quad \omega_{\max} = \sqrt{c_{\max} / M_\Sigma}\ . \tag{22}$$

2. Ротор з приєднаними тілами, корпус якого встановлений на анізотропні опори, при врахуванні сил в'язкого опору в опорах, в залежності від їх величини, має одну чи три критичні швидкості, які є коренями рівняння

$$2(\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2)(\omega_3^2 - \omega^2) + \omega^2[h_x^2(\omega_3^2 - \omega^2) + h_y^2(\omega_1^2 - \omega^2)] = 0, \tag{23}$$

причому ω_i визначаються за формулами (11), і

$$\omega_{\min} = \sqrt{c_{\min} / M_\Sigma}, \quad \omega_{\max} = \sqrt{c_{\max} / M_\Sigma}, \quad h_x = H_x / M_\Sigma, \ h_y = H_y / M_\Sigma\ . \tag{24}$$

3. Ротор на ізотропних опорах має єдину критичну швидкість

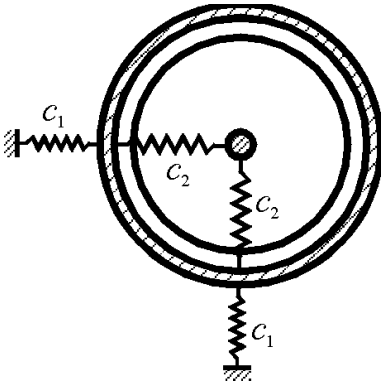
$$\omega_1 = \sqrt{c / M_\Sigma}\ . \tag{25}$$

Аналог цієї формули одержували для конкретних типів АБП А.А.Гусаров [1], E.Tearle [2,3] і інші вчені. На відміну від раніше одержаних формул, вираз (25) застосовний для будь-якого типу АБП, зокрема рідинного та комбінованого і враховує масу додаткового тіла, прикріпленого до ротора.

Використовуючи результати роботи [5] визначимо критичні швидкості для інших плоских моделей ротора.

4. Для ротора, пружно закріпленого в АТТ, яке також пружно закріплене і рухається поступально (рис. 3) були одержані такі три критичні швидкості [5]:

$$\omega_1 = \sqrt{x_1}, \ \ \omega_2 = \sqrt{(c_1 + c_2)/M_1}, \ \ \omega_3 = \sqrt{x_2} \ : \ \omega_1 < \omega_2 < \omega_3, \tag{26}$$



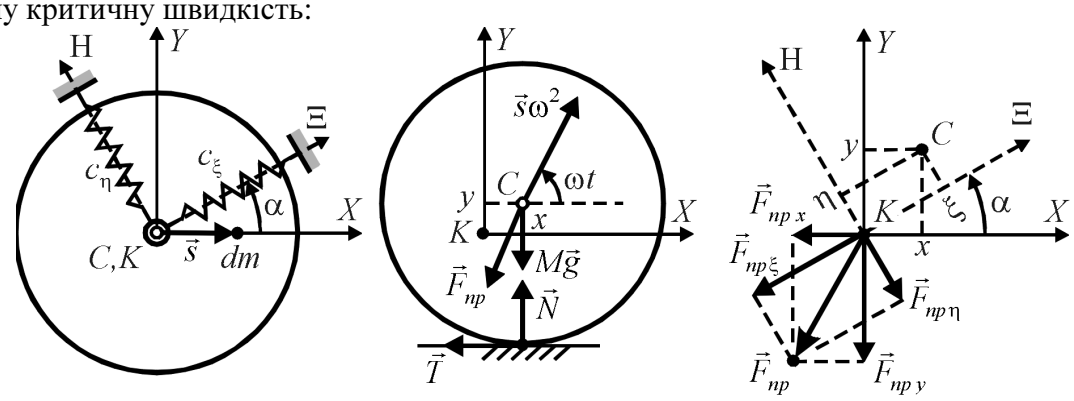
де: M_1 – маса АТТ; c_1, c_2 – жорсткості опор тіла і ротора; x_1, x_2 – параметри, які визначаються нижче. Якщо до ротора приєднані додаткові тіла, то в формули для визначення x_1, x_2 треба підставляти замість маси ротора – сумарну масу ротора і приєднаних до нього тіл:

$$x_{1,2} = \frac{M_1 c_2 + M_\Sigma (c_1 + c_2)}{2 M_1 M_\Sigma} \mp$$

$$\mp \left[\left(\frac{M_1 c_2 + M_\Sigma (c_1 + c_2)}{2 M_1 M_\Sigma} \right)^2 - \frac{c_1 c_2}{M_1 M_\Sigma} \right]^{1/2}. \tag{27}$$

Автобалансування настає між першою і другою, та над третьою критичними швидкостями. Зауважимо, що за наявністю корпуса саме він кріпиться до АТТ, а не ротор.

5. Ротор під час різання (шліфування) (рис. 4), з врахуванням приєднаних тіл має єдину критичну швидкість:



а б в

Рисунок 4 - Ротор під час різання (шліфування)

- у випадку анізотропних опор

$$\omega_1 = \sqrt{(c_x + fc_{xy})/M_\Sigma}\,, \tag{28}$$

де: c_x, c_y, c_{xy} – жорсткості опор відносно осей X, Y;

f – коефіцієнт сухого тертя (шліфування, різання);

- у випадку ізотропних опор ($c_x = c_y = c,\ c_{xy} = 0$)

$$\omega_1 = \sqrt{c/M_\Sigma}\,. \tag{29}$$

Автобалансування настає на швидкостях, які перевищують єдину критичну швидкість.

Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1) у рамках плоскої моделі ротора на анізотропних в'язко-пружних опорах, у реальних для практиці випадках, у системи ротор АБП три критичні швидкості, причому сили опору в опорах збільшують найменшу і зменшують найбільшу критичні швидкості системи, знайдені без їх врахування;
2) у рамках плоскої моделі ротора на ізотропних в'язко-пружних опорах сили в'язкого опору в опорах не впливають на єдину критичну швидкість системи ротор-АБП;
3) для визначення критичних швидкостей системи ротор-АБП з врахуванням додаткових тіл, які рухаються з ротором (КВ, дисбалансу, корпуса), треба підставити у критичні швидкості, одержані без врахування додаткових тіл, замість маси ротора – сумарну масу ротора і всіх тіл, що з ним рухаються.

Список літератури

1. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия. -М.: Наука, 2002. -119 с.
2. Thearle E. L. Automatic dynamic balancers Part 1 – Leblanc balancers // Machine Design, 1950a, Vol. 22 No 9, pp. 119-124.
3. Thearle E. L. Automatic dynamic balancers Part 2 – Ring, pendulum and ball balancers // Machine Design, 1950b, Vol. 22 No 10, pp. 103-106.
4. Thearle E. L. Automatic dynamic balancers Part 3 – Designing for complete effectiveness // Machine Design, 1950c, Vol. 22 No 11, pp. 149-153.
5. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами: Монографія (за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин). - Кіровоград: КНТУ, 2004. - 352 с.

УДК 62-755: 62-752

Г.Б. Філімоніхін, доц., канд. фіз.-мат. наук, В.С. Майоров
Кіровоградський національний технічний університет

Вплив приєднаної маси на динаміку ротора при просторовому русі

Досліджений вплив приєднаної маси на динаміку ротора при просторовому русі. Встановлено правило переходу від диференціальних рівнянь руху системи без приєднаної маси до рівнянь – з приєднаною масою. Досліджено вплив приєднаної маси на частоти коливання ротора.
ротор, дисбаланс, зрівноваження, автобалансир

В сільськогосподарських машинах, переробній промисловості, побутовій техніці і т.д. широко використовуються машини, в яких ротор (сепаратор, шпиндель, екстрактор і т.п.) встановлений у важкий пружно закріплений корпус і здійснює просторовий рух [1-3]. Такі ротори балансуються пасивними автобалансирами на ходу – під час експлуатації. В роботах [4-6] проведені дослідження динаміки таких роторів, але без урахування приєднаної маси. У зв'язку з тим, що приєднана маса може бути значною, постає задача дослідження її впливу на динаміку ротора.

Оскільки моделі таких систем подібні, дослідимо вплив приєднаної маси на динаміку системи на прикладі впливу маси бака пральної машини на динаміку системи бак-барабан. В ній барабан жорстко встановлений в бак, який має значно більшу масу ніж барабан і пружно закріплений в корпусі пральної машини.

На рисунку 1 наведена схема, що пояснює спосіб визначення руху барабана на жорсткому невагомому валі в баку встановленому на пружних опорах. На рис.1, а. показано початкове положення бака і барабана. Для опису руху барабана і бака використовуємо нерухому прямокутну систему координат $Kxyz$, таку, що вісь z спрямована по осі обертання, вісь x спрямована у бік центру мас системи, а вісь y спрямована так, що система координат – права (рис.1, а). Координати x, y задають поступальний рух системи разом з центром мас – точкою C, яка співпадає з точкою K, і є центром мас як бака так і барабана, при невідхиленому валі (рис.1, б). Кути Резаля α,β визначають поворот вала барабана навколо точки і поворот барабана (рис.1, в, г). Вважаємо, що барабан обертається із сталою кутовою швидкістю ω.

Першу групу диференціальних рівнянь руху системи дає теорема про рух центра мас:

$$M_\Sigma \ddot{x} = R_x^{(зовн)},\ M_\Sigma \ddot{y} = R_y^{(зовн)}, \qquad (1)$$

де $M_\Sigma = M_1 + M_2$, M_1 – маса барабана, M_2 – маса бака; $R_x^{(зовн)}$, $R_y^{(зовн)}$- проекції головного вектора зовнішніх сил на осі x, y.

Для складання другої групи рівнянь динаміки системи використовуємо теорему про зміну моменту кількості руху матеріальної системи. За рухомі осі приймаємо $K\xi\eta\zeta$. Тоді теорема має вид:

$$d'\vec{K}_c / dt = \vec{M}_c^{(з)}, \qquad (2)$$

© Г.Б. Філімоніхін, В.С. Майоров. 2004

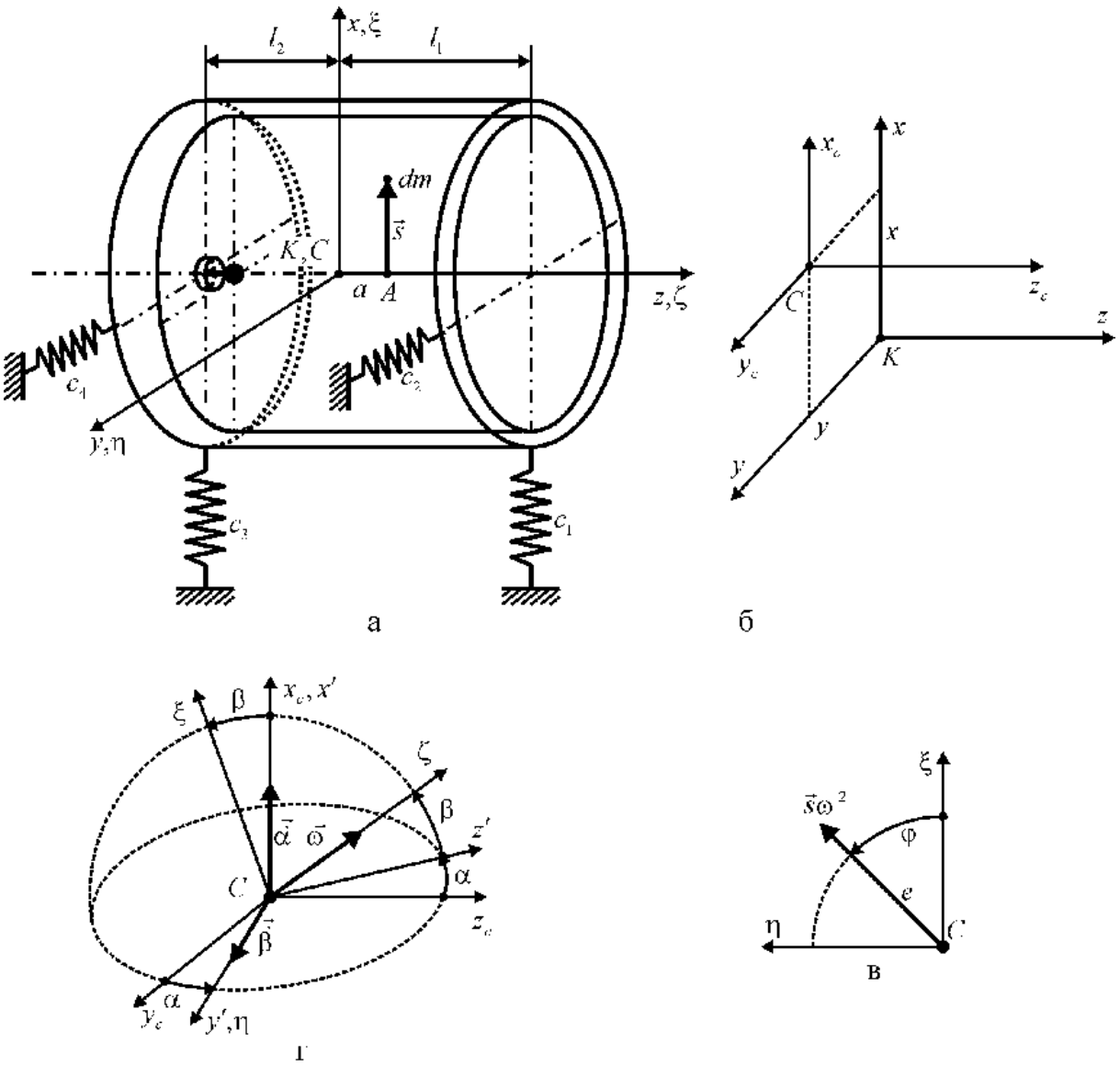


Рисунок 1 – Модель ротора на жорсткому валу в корпусі (баці) на пружних опорах

де: $\vec{K}_c$ - кінетичний момент системи, $d'\vec{K}_c/dt$ - його похідна в рухомій системі координат $K\xi\eta\zeta$; $\vec{M}_c^{(з)}$ - головний момент зовнішніх сил, що діють на систему, знайдений відносно точки K; $\omega_{1_{\xi\eta\zeta}}$ - абсолютна швидкість обертання барабана; $\widetilde{I}_1$ - його тензор інерції відносно точки K; $\omega_{2_{\xi\eta\zeta}}$ - абсолютна швидкість обертання бака; $\widetilde{I}_2$ - його тензор інерції відносно точки K.

Бак - симетричний з головними осьовими моментами інерції відносно центру мас A_2, A_2, C_2. Центри мас бака і барабана співпадають.

У проекціях на осі $K\xi\eta\zeta$:

$$\widetilde{I}_1 = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 \end{pmatrix}, \ \widetilde{I}_2 = \begin{pmatrix} A_2 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 \end{pmatrix}. \qquad (3)$$

$$\omega_{1_{\xi\eta\zeta}} = \begin{pmatrix} \dot{\alpha}\cos\beta \\ \dot{\beta} \\ \dot{\varphi} + \dot{\alpha}\sin\beta \end{pmatrix},\ \omega_{2_{\xi\eta\zeta}} = \begin{pmatrix} \dot{\alpha}\cos\beta \\ \dot{\beta} \\ \dot{\alpha}\sin\beta \end{pmatrix}. \tag{4}$$

Проліанеризувавши рівняння (4) маємо такі кутові швидкості:

$$\omega_{1_{\xi\eta\zeta}} = \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix},\ \omega_{2_{\xi\eta\zeta}} = \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Знаходимо кінетичний момент у проекціях на рухомі осі:

$$\vec{K}_{c\xi\eta\zeta} = \vec{\omega}_{1_{\xi\eta\zeta}} \widetilde{I}_1 + \vec{\omega}_{2_{\xi\eta\zeta}} \widetilde{I}_2,$$

$$\vec{K}_{c\,\xi\eta\zeta} = \begin{pmatrix} \vec{i}\left[(A_1 + A_2)\dot{\alpha}\right] \\ \vec{j}\left[(A_1 + A_2)\dot{\beta}\right] \\ \vec{k}\left[C_1\dot{\varphi}\right] \end{pmatrix}. \tag{6}$$

При невеликих кутових поворотах вала кінетичний момент системи і його відносна похідна, знайдені відносно центра мас системи, і розкладені на складові, спрямовані по осях $Cx_C y_C z_C$, мають вигляд:

$$\vec{K}_c = \begin{pmatrix} \vec{i}\left[\dot{\alpha}(A_1 + A_2) + C_1\dot{\varphi}\beta\right] \\ \vec{j}\left[\dot{\beta}(A_1 + A_2) - C_1\dot{\varphi}\alpha\right] \\ \vec{k}\left[C\dot{\varphi}\right] \end{pmatrix};\ \frac{d'\vec{K}_c}{dt} = \begin{pmatrix} i\left[\ddot{\alpha}(A_1 + A_2) + C_1\dot{\varphi}\dot{\beta}\right] \\ j\left[\ddot{\beta}(A_1 + A_2) - C_1\dot{\varphi}\dot{\alpha}\right] \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{7}$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори, спрямовані відповідно по координатним осям x_C, y_C, z_C.

Тоді теорема про зміну моменту кількості руху матеріальної системи відносно її центра мас дає такі два диференціальні рівняння:

$$\ddot{\alpha}(A_1 + A_2) + C_1\dot{\varphi}\dot{\beta} = M_{x_C}^{(зовн)},\ \ \ddot{\beta}(A_1 + A_2) - C_1\dot{\varphi}\dot{\alpha} = M_{y_C}^{(зовн)}. \tag{8}$$

$M_{x_C}^{(зовн)}, M_{y_C}^{(зовн)}$ – головні моменти зовнішніх сил, діючих на систему, знайдені відносно центральних осей x_C, y_C. Через малість дисбалансу вважаємо, що він майже не впливає на масу й осьові моменти інерції ротора. Вважаємо, що його дія проявляється тільки через відцентрові сили інерції. Тоді головні моменти зовнішніх сил можна визначати відносно точки C, яка знаходиться на валу барабана. Зовнішні сили і моменти утворюються дисбалансом і пружними силами, що діють на вал барабана:

$$\begin{aligned} R_x^{(зовн)} &= R_x^{(s)} + R_x^{(c)}, & R_y^{(зовн)} &= R_y^{(s)} + R_y^{(c)}, \\ M_{x_C}^{(зовн)} &= M_{x_C}^{(s)} + M_{x_C}^{(c)}, & M_{y_C}^{(зовн)} &= M_{y_C}^{(s)} + M_{y_C}^{(c)} \end{aligned} \tag{9}$$

Проекції на нерухомі осі складових, викликаних дисбалансом

$$\begin{aligned} R_x^{(s)} &= s\omega^2\cos\omega t, & R_y^{(s)} &= s\omega^2\sin\omega t, \\ M_{x_C}^{(s)} &= -sa\omega^2\sin\omega t, & M_{y_C}^{(s)} &= sa\omega^2\cos\omega t. \end{aligned} \tag{10}$$

Оскільки положення вала цілком визначається чотирма узагальненими координатами x, y, α, β, то і проекції головного вектора і головного моменту пружних сил є функціями цих координат. Оскільки на вал діють лінійні пружні сили і відхилення вала незначні, то проекції головного вектора і головного моменту є лінійними функціями цих координат:

$$\begin{aligned} R_x^{(c)} &= -k_{11}x - k_{12}y - k_{13}\alpha - k_{14}\beta, & R_y^{(c)} &= -k_{12}x - k_{22}y - k_{23}\alpha - k_{24}\beta, \\ M_{x_C}^{(c)} &= -k_{13}x - k_{23}y - k_{33}\alpha - k_{34}\beta, & M_{y_C}^{(c)} &= -k_{14}x - k_{24}y - k_{34}\alpha - k_{44}\beta. \end{aligned} \tag{11}$$

де k_{ij} - коефіцієнти жорсткості, що залежать від способу пружного закріплення ротора.

В найбільш загальному випадку всі коефіцієнти не дорівнюють нулю. При цьому одинична узагальнена сила, спрямована вздовж однієї будь-якої узагальненої координати, викликає зміну решти узагальнених координат. Такий випадок можливий, наприклад тоді, коли ліва і права опори анізотропні, причому головні напрямки лівої опори не співпадають з головними напрямками правої опори.

З врахуванням (9)-(11) диференціальні рівняння руху ротора приймають вигляд:

$$\begin{aligned}
&(M_1+M_2)\ddot{x}+k_{11}x+k_{12}y+k_{13}\alpha+k_{14}\beta=s\omega^2\cos\omega t,\\
&(M_1+M_2)\ddot{y}+k_{12}x+k_{22}y+k_{23}\alpha+k_{24}\beta=s\omega^2\sin\omega t,\\
&(A_1+A_2)\ddot{\alpha}+C\omega\dot{\beta}+k_{13}x+k_{23}y+k_{33}\alpha+k_{34}\beta=-sa\omega^2\sin\omega t,\\
&(A_1+B_2)\ddot{\beta}-C\omega\dot{\alpha}+k_{14}x+k_{24}y+k_{34}\alpha+k_{44}\beta=sa\omega^2\cos\omega t.
\end{aligned} \tag{12}$$

З рівнянь (12) видно, що вплив приєднаної маси на динаміку барабана, проявляється у зміні коефіцієнтів перед прискореннями у рівняннях, які описують динаміку барабана. Тому можна сформулювати правило переходу від системи диференціальних рівнянь без приєднаної маси до системи диференціальних рівнянь з приєднаною масою, яке полягає у наступному: *1) маса барабана замінюється сумарною масою системи; 2) екваторіальний момент інерції барабана замінюється сумою екваторіальних моментів інерції барабана і бака.*

З цього правила випливає аналогічне правило що до визначення швидкостей.

Розглянемо випадок, коли барабан симетрично встановлений на ізотропні опори коефіцієнти жорсткості дорівнюють.

$$k_{11}=k_{22}=c_{11},\ k_{ij}=0, i\neq j,\ k_{33}=k_{44}=c_{33}. \tag{13}$$

Відповідно до роботи [6] і встановленого правила, матимемо наступне:

1) Довгий ротор $A>C$. Його критичні швидкості:

$$\begin{aligned}
\omega_1&=\sqrt{\frac{c_{11}}{M_1+M_2}},\\
\omega_2&=\sqrt{\frac{c_{33}+c_{11}a^2}{(A_1+A_2)+(M_1+M_2)a^2-C_1}};\\
\omega_3&=\sqrt{\frac{c_{33}}{(A_1+A_2)-C_1}}.
\end{aligned} \tag{14}$$

Автобалансування наступатиме між першою і другою, та над третьою критичними швидкостями.

2) Сферичний ротор $A=C$. Його критичні швидкості:

$$\omega_1=\sqrt{\frac{c_{11}}{M_1+M_2}},\ \omega_2=\sqrt{\frac{c_{33}+c_{11}a^2}{(M_1+M_2)a^2}};\ \omega_1<\omega_2. \tag{15}$$

Автобалансування наступатиме між першою і другою критичними швидкостями.

3) Короткий ротор $A<C$. Його критичні швидкості:

а) $(A_1+A_2)+(M_1+M_2)a^2>C_1$

$$\omega_1=\sqrt{\frac{c_{11}}{M_1+M_2}},\ \omega_2=\sqrt{\frac{c_{33}+c_{11}a^2}{(A_1+A_2)+(M_1+M_2)a^2-C_1}};\ \omega_1<\omega_2. \tag{16}$$

б) $(A_1 + A_2) + (M_1 + M_2)a^2 < C_1$;

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{c_{11}}{M_1 + M_2}}. \qquad (17)$$

Автобалансування наступатиме над єдиною критичною швидкістю.

З рівнянь (14-17) видно, що приєднана маса зменшує критичні швидкості ротора. Звідки слідує, що явище балансування буде з'являтись при менших швидкостях обертання ротора. Це дає змогу застосовувати пасивні автобалансуючі пристрої для балансування роторів з малими швидкостями обертання.

Проведені дослідження дають можливість зробити такі висновки:

1. Встановлено правило врахування приєднаної маси при складанні диференціальних рівнянь і визначенні критичних швидкостей, яке полягає в наступному: 1) маса барабана замінюється сумарною масою системи; 2) екваторіальний момент інерції барабана змінюється сумою екваторіальних моментів інерції барабана і бака.
2. Приєднана маса зменшує критичні швидкості ротора, чим забезпечується настання автобалансування на менших швидкостях обертання.

Список літератури

1. Б.Е. Фишман Ремонт, наладка, испытания бытовых электроприборов. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 240 с.
2. Э.В. Лир, И.В. Петко Электробытовые машины и приборы – К.: Техника, 1990.– 272 с.
3. Д.А. Лепаев Электричские приборы бытового назначения – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 270 с.
4. Гусаров А.А., Сусанин В.И., Шаталов Л.Н., Грушин Б.М. Автоматическая балансировка роторов машин. -М.: Наука, 1997. -151 с.
5. Горошко О.О. Гіроскопічні системи: Навчальний посібник. – К.:ВПЦ „Київський університет", 1994. – 116с.
6. Филимонихин Г.Б. Зрівноваження і вітрозахист роторів автобалансирами з твердими корегувальними вантажами: Монографія. – Кіровоград, 2004. – 354 с.

УДК 681.17; 631.331

М.Д. Пархоменко, Ю.М. Пархоменко, інженери, І.М. Єніна, канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Імітація руху сівалки при визначенні якості висіву в лабораторних умовах

Описується методика та принцип дії "імітатора руху сівалки". Реалізація описаної схеми дозволяє: враховувати координату місця реєстрації зерна в межах зони контролю датчика; реєструвати до трьох об'єктів на двохміліметровій ділянці руху сівалки; підвищити точність реєстрації відстаней між зернами в рядку.

імітатор руху сівалки, оптико-електронний датчик, висівний апарат, лічильник швидкості, електронний конвеєр

Створення нових і модернізація існуючих високопродуктивних, технологічних та конкурентоспроможних посівних машин на сьогодні стримується низьким рівнем автоматизації стендових випробувань та досліджень. Тому конструктори сівалок до останнього часу, особливо при проведенні офіційних випробувань, для оцінки якості висіву користуються традиційними стендами з "нескінченною" клейкою стрічкою, вдосконалюючи лише методи вимірювання та обчислення параметрів висіяного на стрічку зернового потоку і витрачаючи дорогоцінний час та кошти на реєстрацію та обробку результатів вимірювання. При цьому низькими являються не лише рівень випробування, а й культура та умови роботи дослідника.

Розроблені в останні роки системи контролю висіву типу: "НИВА 23" (ТОВ "Полтавська інженерна група", Україна) [1]; "Мустанг" (м. Новосибірськ, Росія) та інші, які побудовані на базі сучасних мікро контролерів і призначені для роботи в польових умовах, можна, без суттєвих доробок, використовувати в якості стендового обладнання для оцінки норми висіву та якості розподілу зерен в рядку при випробуванні сівалок точного висіву і обмеженій точності вимірювання. Одним із суттєвих недоліків даних систем, є неспроможність їх датчиків реєструвати зерна двійники та визначати координати місця падіння зерна на рівні грунту.

Співробітниками Кіровоградського національного технічного університету розроблено двохкоординатний скануючий датчик зернового потоку, спроможний розпізнавати до 7 роз'єднаних (не зклеєних) зернин в потоці, які одночасно перетинають площину реєстрації датчика [2]. За цим, в схему реєстрації та розпізнавання об'єктів, що пролітають через площину реєстрації поступає бінарний (двійковий) код зображення їх проекцій на осі X та Y. Формування імпульсу сходження прив'язане до координати місця $X_k = k \cdot h$ перетину об'єктом площини реєстрації датчика вздовж осі X – напрямку руху сівалки. Суттєвим недоліком вказаного датчика, як і означеного вище ємнісного, є методика реєстрації та визначення відстані між зернами в рядку укладеними на дні борозни, яка не дозволяє враховувати координату місця перетину об'єктом площини реєстрації. Як ємнісний так і оптико-електронний скануючий датчики формують імпульси від об'єктів рознесені в часі, що дозволяє з високим ступенем точності визначати часові інтервали ΔT_i між моментами їх перетину t_i площини реєстрації датчика (1). Відстань між зернами в рядку ΔX_i визначається як добуток часового інтервалу ΔT_i на задану швидкість руху сівалки V_c (2).

© М.Д. Пархоменко, Ю.М. Пархоменко, І.М. Єніна. 2004

$$\Delta T_i = t_{i+1} - t_i \quad (1)$$

$$\Delta X_i = V_c \cdot \Delta T_i \quad (2)$$

Ця методика задовольняла б дослідників за умови, що усі об'єкти пролітають через середину площини реєстрації датчика. В дійсності ж об'єкти перетинають площину реєстрації в довільних точках, що вносить систематизовану похибку у визначення відстані між зернами в рядку. Тобто, вказані датчики не враховують розсіювання зернового потоку в межах зони контролю. При цьому величина абсолютної похибки дорівнює половині діаметру або довжини площини реєстрації датчика вздовж координати X ($\pm D/2$ чи $\pm L/2$).

В основу імітації руху сівалки на стенді з "нескінченною" клейкою стрічкою закладено принцип роботи механічного конвеєра. Вказаний стенд має стаціонарно встановлений висівний апарат під яким, із швидкістю сівалки V_c, рухається липка стрічка – "грунт" на яку укладаються зерна. Відстані між зернинами на стрічці ΔX_i, за умови стабільності руху сівалки та прийнятої точності вимірювання, близькі до реальних при висіванні у грунт.

Для того, щоб врахувати розсіювання зерна вздовж рядку висіву в межах зони контролю до складу існуючого оптико – електронного датчика додається схема імітації руху сівалки, яка по аналогії з "механічним конвеєром" має "електронний конвеєр". Ця схема дозволяє ув'язати момент видачі імпульсу сходження об'єкту з координатою перетину ним площини реєстрації датчика X_k та швидкістю руху сівалки V_c. Отримані при цьому інтервали часу ΔT_i між моментами реєстрації сусідніх зернин в потоці та визначені за формулою (1) відстані ΔX_i між зернинами в рядку позбавлені вказаної вище систематичної похибки. Ці дані повинні повністю співпадати з даними, отриманими за допомогою стенду з "нескінченною клейкою стрічкою".

Принцип дії імітатора заключається в занесенні вхідних імпульсів сходження, що формуються блоком реєстрації та розпізнавання оптико – електронного датчика при перетині об'єктами довільних ділянок контролю з координатами X_k, в комірки електронного конвеєра, який рухається з заданою швидкістю V_c, та видачі вихідних імпульсів сходження при розвантаженні електронного конвеєра.

Рух конвеєра здійснюється дискретно. Шаг переміщення дорівнює 2мм, що відповідає шагу дискретизації реєструючої рамки датчика вздовж координати X [2]. Кожне переміщення задається імпульсом просування конвеєру ІПК, період надходження якого дорівнює часу проходження сівалкою відстані у 2мм із швидкістю V_c. Ємність кожної комірки електронного конвеєра достатня для розміщення до трьох імпульсів сходження, що дає можливість реєструвати від нуля до трьох об'єктів на 2мм шляху.

На рис. 1 представлена структурна схема імітатора руху сівалки, яка включає:

- задаючий генератор імпульсів просування комірок електронного конвеєру (ЗГІПЕК);
- вузол контролю та відображення швидкості (ВКіВШ), до складу якого входить контрольний лічильник та дисплей;
- блок електронного конвеєру (БлЕК).

Роботу схеми забезпечують також (див. рис. 1):

- блок реєстрації та розпізнавання образів реєструємих об'єктів (БлРРО), в якому формуються вхідні імпульси сходження $СХ_к$;
- блок синхронізації та керування датчика (БлСК), що формує імпульси

зчитування ЗЧТ, запису ЗП, скидання СКД, сигнали адресу А1, А2, дозволу на запис та зчитування $*V$ та дозволу на розрахунок числового значення швидкості ДОЗ0.2с.

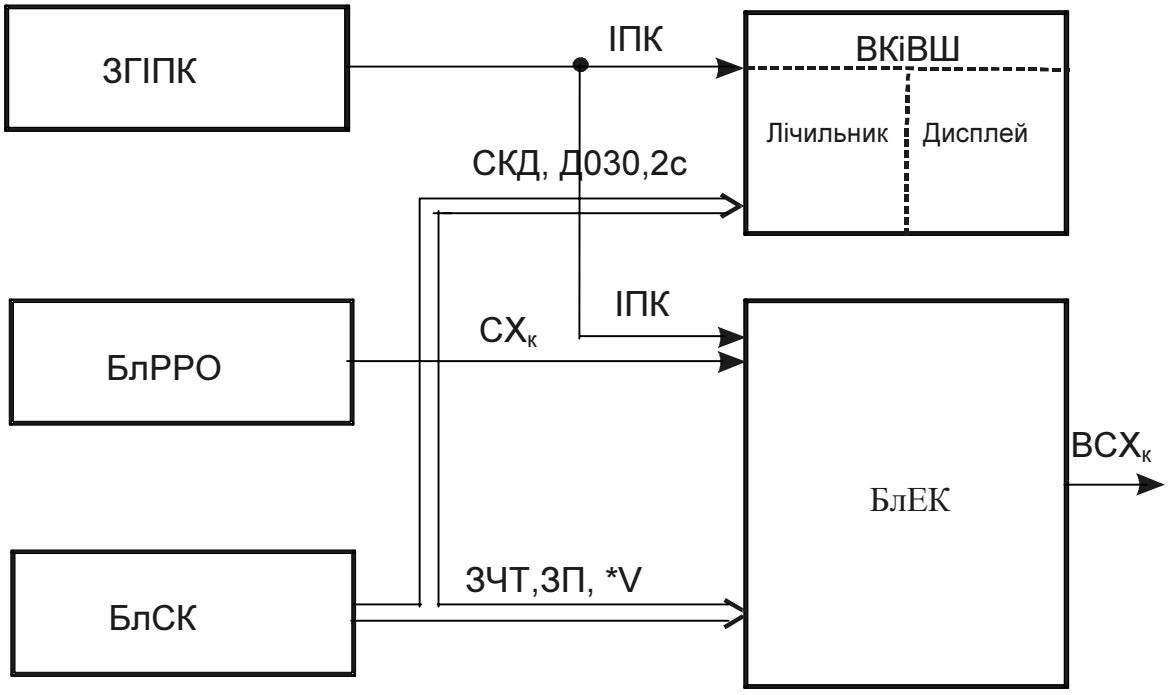


Рисунок 1 - Імітатор руху сівалки. Схема електрична структурна

Методика встановлення швидкості визначається із співвідношень (3):

$$V_c = \frac{h}{T_{ipк}}; \qquad N_c = \frac{t_{зал}}{T_{ipк}};$$

$$S = V_c \cdot t_{зал} = \frac{h}{T_{ipк}} \cdot t_{зал} = h \cdot N_c \tag{3}$$

$$V_c = \frac{S}{t_{зал}} = \frac{h \cdot N_c}{t_{зал}} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot N_c}{0.2} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot N_c(м/с) = N_c(см/с),$$

де V_c - задана швидкість руху сівалки;

h - шаг дискретизації площини реєстрації (для існуючого датчика $h = 2мм$);

$T_{ipк}$ - період надходження імпульсів просування конвеєру ІПК, тривалість якого дорівнює часу проходження сівалкою відстані у 2мм із швидкістю V_c;

S - відстань, яку проходить сівалка за фіксований термін часу $t_{зал}$ із швидкістю V_c;

$t_{зал}$ - заліковий термін часу (в даному випадку $t_{зал} = 0.2c$);

N_c - швидкість руху сівалки($V_c = N_c$) в (см/с).

Виходячи з отриманих співвідношень, приходимо до висновку, що швидкість руху сівалки V_c в см/с чисельно дорівнює кількості імпульсів просування ІПК, які поступають на вхід електронного конвеєра з періодом $T_{ipк}$ за фіксований проміжок часу $t_{зал} = 0.2c$ ($V_c = N_c, N_c = t_{зал} / T_{ipк}$).

Ця методика знайшла свою реалізацію в схемі імітації руху сівалки при встановленні швидкості та забезпеченні дискретного переміщення електронного конвеєра (див. рис. 2).

Імпульси просування ІПК, період надходження $T_{іпк}$ яких встановлюється дослідником шляхом регулювання, з виходу задаючого генератора ЗГІПЕК безперервно надходять до вузла контролю та відображення швидкості ВКіВШ, контрольний лічильник якого попередньо скидається до нуля сигналом СКД. На час дії сигналу дозволу ДОЗ тривалістю 0.2с, який надходить від блоку синхронізації та керування БлСК, імпульси просування ІПК поступають на вхід контрольного лічильника як імпульси рахунку. Зафіксована лічильником протягом 0.2с кількість імпульсів ІПК чисельно відображає швидкість руху конвеєра. N_c. Для того, щоб встановити задану швидкість $V_c = N_c$, необхідно, шляхом регулювання, змінити період $T_{іпк}$ надходження імпульсів просування ІПК в схемі задаючого генератора ЗГІПЕК і повторити контрольне вимірювання.

Блок електронного конвеєра включає (рис. 2.):

- вузол просування конвеєру;
- вузол комутації адресу завантаження та розвантаження комірок конвеєру;
- центральний вузол пам’яті конвеєру;
- схема розвантаження конвеєру.

Робота вузла просування конвеєру. Шестирозрядний двійковий лічильник адресу електронного конвеєра ЛЧА в загальному випадку працює синхронно з лічильником головної адресної магістралі датчика так як зміна їх стану здійснюється від одного і того ж імпульсу запису ЗП. При цьому, в фіксовані проміжки часу між тактами просування, коли конвеєр не рухається, кожному окремому адресу сходження об’єкта з координатою X_k рядка реєстрації завжди відповідає один і той же адрес занесення імпульсу сходження в пам’ять конвеєра.

З появою позитивного фронту імпульсу ІПК тригер просування ТПР1 встановлюється в “1”. Сам сигнал просування формується при завершенні обробки бінарного коду рядка зображення координати *X*, тобто в момент переходу процесу обробки даних з координати *X* на *Y*, який супроводжується формуванням сигналу *X/Y* (для існуючого датчика – цей момент відповідає останній 47-й позиції координати X). Тобто, при появі сигналу *X/Y* та наявності одиничного стану тригеру ТПР1 тригер просування ТПР2 встановлюється в “1” і скидає в”0” тригерТПР1. Своїм інверсним виходом тригер ТПР2 блокує проходження одного імпульсу запису ЗП на вхід лічильника адресу ЛЧА, що приводить до зменшення адресу завантаження – розвантаження електронного конвеєру на одну одиницю по відношенню до адресу рядка, що обробляється (див. рис. 3а).

При цьому конвеєр просувається на одну позицію вправо по відношенню до координати сходження X_k. Тобто, 47-ма позиція виходить за межі координат обробки рядка *X* (0÷47) і фіксується як адреса комірки розвантаження імпульсів сходження, а 63-тя позиція входить в зону занесення даних про сходження об’єктів (див. рис. 3б) до появи нового імпульсу просування ІПК. Тригер ТПР2 скидається до нуля першим же імпульсом зчитування ЗЧТ. У кожному наступному циклі поява імпульсу просування ІПК змінює поточну адресу комірки розвантаження конвеєра на одиницю і адреси комірок пам’яті конвеєра в межах зони контролю датчика з координатами $X_k = 0 \div 47$ в які заносяться імпульси сходження об’єктів (див. рис. 3 в).

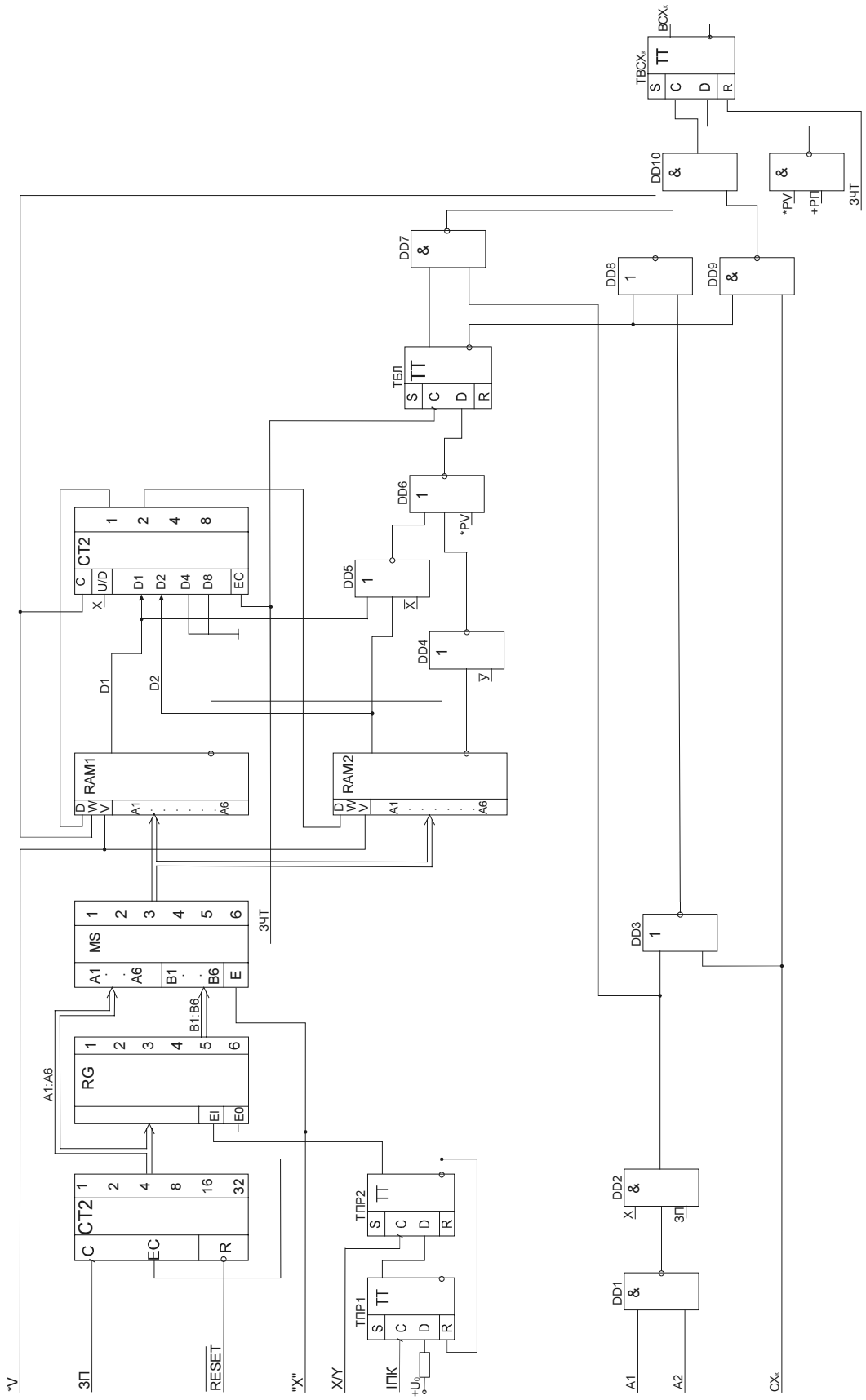


Рисунок 2 – Блок електронного конвеєра

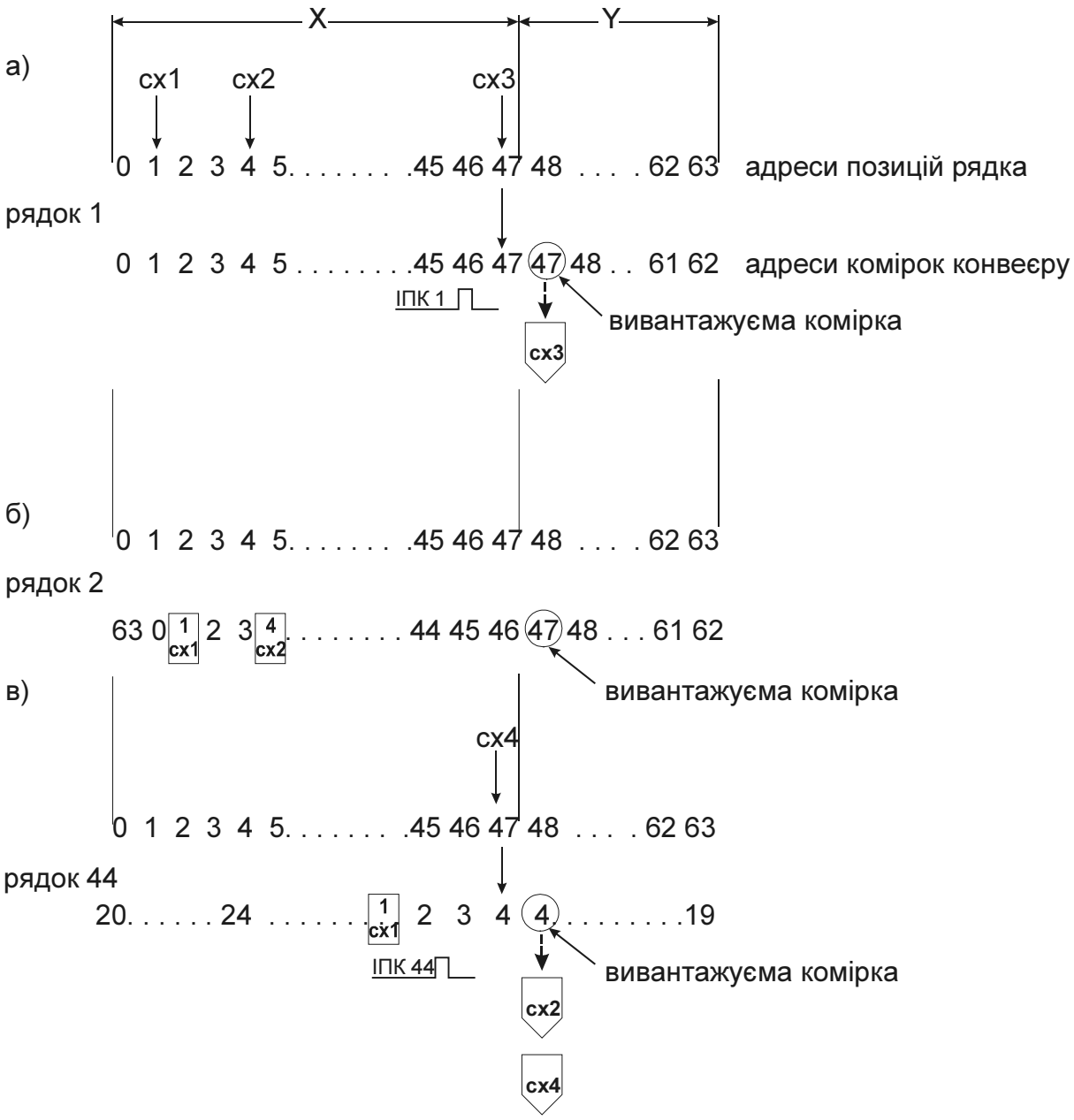


Рисунок 3 - Схема роботи конвеєру

Комутація і формування адресу завантаження та розвантаження комірок конвеєру. При переході тригера ТПР2 із нульового стану в "1" позитивним фронтом сигналу його прямого виходу адреса комірки конвеєра, що підлягає розвантаженню, з виходу призупиненого лічильника ЛЧА переноситься і запам'ятовується в регістрі адресу розвантаження РАР. Ця комірка в результаті просування виходить за межі координат рядка *X* (див. рис.3б).

Мультиплексор МХ забезпечує комутацію сигналів адресу занесення імпульсів сходження об'єктів з виходу лічильника ЛЧА на входи мікросхем пам'яті електронного конвеєра під час обробки позицій (0÷47) координати *X* та комутацію сигналів адресу комірки пам'яті, що підлягає розвантаженню, з виходів регістру РАР на входи тих же мікросхем пам'яті під час обробки позицій (48÷63) координати *Y*. Напрямок комутації задається сигналами **Y* та *Y*.

Робота центрального вузла пам'яті конвеєру. Адресні сигнали DA1÷DA6 подаються на входи мікросхем центрального вузла пам'яті конвеєра.

Для збільшення ємності комірок пам'яті електронного конвеєра до трьох імпульсів сходження в схемі імітатора руху сівалки використовується дві мікросхеми пам'яті RAM1 і RAM2 з паралельною адресацією, що дозволяє зберігати за одним адресом двохрозрядний двійковий код числа імпульсів сходження (00÷11). Формування цього коду здійснюється за допомогою лічильника даних ЛЧД.

Робота вузла пам'яті електронного конвеєра складається із двох процедур:

- занесення даних в пам'ять конвеєра;
- розвантаження комірки пам'яті конвеєра.

Занесення даних про сходження об'єктів в пам'ять конвеєра здійснюється на протязі усього проміжку часу між появою імпульсів просування ІПК, коли конвеєр не рухається. При цьому імпульси сходження, які формуються блоком реєстрації та розпізнавання об'єктів під час обробки даних координати X, послідовно, у відповідності до координат місця їх реєстрації $X_k = 0 \div 47$, заносяться в комірки пам'яті конвеєра (0÷47) поточні адреси яких, на даний період часу, знаходяться в зоні завантаження. Кількість рядків, що обробляється за період простою конвеєра $T_{ітк}$, залежить від швидкості руху сівалки V_c. Занесення даних в пам'ять конвеєра RAM1, RAM2 по сигналу $*V$ здійснюється синхронно з їх формуванням в зоні контролю координати X. З кожним імпульсом зчитування ЗЧТ, що поступає з блоку синхронізації та керування БлСК, інформація **i**-тої комірки пам'яті RAM1, RAM2 за заданим адресом зчитується паралельним кодом в лічильник даних ЛЧД. Одночасно тригером ТБЛ фіксуються умови блокування запису в пам'ять RAM1, RAM2 при виникненні наступних обставин:

- задано режим роботи датчика без імітації руху сівалки (сигнал $*PV$ має високий рівень) (DD6);
- в комірці пам'яті RAM1, RAM2 зафіксовано три імпульси сходження $CX_к$,, код "11", під час процедури занесення сходів по сигналу $"\overline{Y}"$, признак $"1" \wedge "1" \wedge "X"$ (DD4);
- в комірці пам'яті RAM1, RAM2 зафіксовано код "00" під час процедури її розвантаження по сигналу $"\overline{X}"$, признак $"0" \wedge "0" \wedge "Y"$ (DD5).

За відсутності умов блокування (тригер ТБЛ в "1") імпульс сходження $CX_к$, що поступає від блоку реєстрації та розпізнавання образів БлРРО своїм позитивним фронтом збільшує на "1" значення лічильника ЛЧД при високому рівні сигналу "X", а потім негативним фронтом того ж імпульсу $CX_к$ переносить отримане значення лічильника в ту ж саму комірку пам'яті. При аналізі чергового рядка сканування зони контролю в межах того ж часового періоду $T_{ітк}$ і появі нового імпульсу сходження $CX_к$ за тим же адресом пам'яті, вміст числового коду вказаної комірки, у відповідності до описаного вище процесу, знову збільшиться на "1". При переповненні даної комірки тригер ТБЛ скидається в "0" імпульсом зчитування ЗЧТ і блокує (DD8) проходження чергового імпульсу сходження $CX_к$ на вхід лічильника даних ЛЧД та мікросхем пам'яті RAM1, RAM2. В той же час він дає дозвіл (DD9) на прямий транзит імпульсу сходження $CX_к$ до виходу схеми імітації руху. В разі відсутності імпульсів сходження $CX_к$ вміст комірки не змінюється.

Процес розвантаження конвеєру Як відмічалося вище, під час обробки даних координати Y на шини DA1÷DA6 видається адрес комірки конвеєра, що підлягає розвантаженню. Імпульси розвантаження ІРВ формуються синхроімпульсами запису ЗП при появі коду "11" молодших розрядів адресної магістралі A1, A2 (DD1, DD2), що дозволяє збільшити часові інтервали між вихідними імпульсами сходження $BCX_к$ до 12мкс.

За відсутності блокування, тригер ТБЛ знаходиться в “1”, кожний стробуючий імпульс ІРВ зменшує (DD8) значення лічильника ЛЧД на “1” і записує отриманий код в комірку пам’яті конвеєра яка в даний час розвантажується. Одночасно цей же імпульс ІРВ поступає (DD7, DD10) на вхід тригера – формувача вихідних сигналів ТФВС з метою збільшення їх протяжності.

При коді “00” комірки розвантаження тригер ТБЛ скидається до”0” імпульсом зчитування ЗЧТ і блокує (DD8) проходження чергового імпульсу розвантаження ІРВ на вхід лічильника даних ЛЧД та (DD7, DD10) тригера – формувача ТФВС.

При роботі датчика в прямому режимі без імітації руху (сигнал $*PV$ низький) тригер ТБЛ скидається до”0”, блокує роботу електронного конвеєру і дає дозвіл на прямий транзит (DD9) імпульсів сходження $CX_к$ через тригер ТФВС до виходу імітатора.

Алгоритм роботи електричної схеми, без суттєвих змін, може бути використаним при розробці програми “імітатора руху сівалки” для ПЕОМ.

Реалізація схеми імітації руху сівалки дозволяє:

- враховувати координату місця реєстрації зерна в межах зони контролю датчика;
- реєструвати до трьох об’єктів на двохміліметровій ділянці руху сівалки;
- підвищити точність реєстрації відстаней між зернами в рядку.

Список літератури

1. Система контроля высева «НИВА 23». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Под редакцией В. Руденко // ООО “Полтавская инженерная группа” – Полтава, 2002. – 43с.
2. Пархоменко М. Д. Лукьяненко А. А., Горевой И. Н. Устройство регистрации семенного потока // Проблеми розробки, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. Зб-к наук. праць. – Кіровоград, 1995. - С. 132 – 137.

УДК 621.9.06

І.А. Валявський
Кіровоградський національний технічний університет

База даних для прогнозування розвитку технологічного обладнання з паралельною кінематикою

В статті розглянуто прогноз розвитку технологічного обладнання з паралельною кінематикою на основі бази даних патентів і авторських свідоцтв на компоновочні рішення і конструкції верстатів з паралельною кінематикою.
прогнозування, база даних, верстат з паралельною кінематикою

Прогнозування – це інформація про потенційні можливості розвитку техніки, яка представлена у вигляді імовірнісної категорії. Ця інформація містить цільові вимоги до об'єкту прогнозування, опис об'єкту і можливих варіантів його розвитку, правила і критерії відбору оптимальних рішень.

Для полегшення обробки і систематизації інформації при прогнозуванні розвитку технологічних систем формуються бази даних (БД), в яких міститься інформація про технологічну систему (ТС), її компоненти, а також відомості про патенти і авторські свідоцтва на конструкції основних вузлів ТС.

На кафедрі “Металорізальні верстати та системи” Кіровоградського національного технічного університету згідно державної програми КПКВ 2201040 "Прикладні розробки за напрямками науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів" та теми 46Б103 "Розробка високоефективних приводів перемінної структури агрегатно-модульного верстатного обладнання" та кафедрі “Конструювання верстатів та машин” НТУУ “КПІ” було створено БД для прогнозування розвитку технологічного обладнання з паралельною кінематикою.

Формування БД проводиться по патентах, які мають відношення до верстатів з паралельною кінематикою, симуляторів руху, систем позиціювання та методів контролю, приводів систем, роботів та маніпуляторів. Це дозволяє здійснювати пошук, накопичення і систематизацію даних по таких патентах.

БД “Патенти верстатів з паралельною кінематикою” складається із семи масивів, кожен з яких відображає певні відомості про патент чи авторське свідоцтво на винахід. Масив нумераційна характеристика (МНХ) – систематизований по країнах, в рамках кожної країни по порядку номерів патентів. Він є джерелом відомостей для складання масиву фірм-патентовласників (МФП) та масиву приоритетних заявок (МПЗ). МФП систематизується за назвами фірм, а всередині кожної фірми по даті подачі заявки. Відомості про патенти-аналоги заносяться в масив патентів-аналогів (МПА) по мірі їх отримання. В МПЗ дані систематизуються по датам приоритетних заявок, а масив тематичності патентів (МТП) має записи про рубрику міжнародної патентної класифікації (МПК) та назву патенту. Масив текстової інформації (МТІ) містить короткий опис суті патенту, а масив графічної інформації (МГІ) містить рисунок, який доповнює характеристику даного патенту.

Накопичення інформації по базі даних здійснюється з всіх відомих і доступних джерел, які фіксуються у відповідному полі БД (власне патенти чи авторські свідоцтва, реферативні журнали, інформація з джерел рекламного характеру, з мережі Internet, статті, різноманітні огляди. В результаті наповнення записів системою управління БД

© І.А. Валявський. 2004

проводиться оцінка повноти поданої інформації: часткова - якщо зафіксовано не більше шести записів (як правило це номер та назва патенту, фірма-патентовласник, країна, рік реєстрації, ім'я автора; обмежена – крім поданих вище зафіксовано наявність патентів-аналогів, номери цих патентів та відомості про їх авторів; та повна – форма запису є завершеною (обов'язковим є наявність графічної та текстової інформації). Ця інформація відображається на екрані дисплея у відповідній комірці, яка може приймати три значення (Ч - часткова, О – обмежена, П – повна).

Рисунок 1 – Запуск бази даних верстатів
з паралельною кінематикою

При запуску бази даних завантажується форма (рис.1), в якій користувачу пропонується вибрати один із варіантів запуску бази даних.

Кнопка "Відкрити форму в режимі вводу інформації" запускає вікно бази даних, при цьому повністю всі поля бази порожні. Порядковий номер патенту, що вводиться висвітлюється в нижній частині екрана.

Кнопка "Відкрити форму для редагування" запускає вікно бази даних з інформацією про останній набраний патент. В полі "порядковий номер" патенту можна переглянути список всіх вже введених патентів та вибрати необхідний. Після чого можна здійснити редагування введеної інформації. Всі проведені зміни зберігаються в базі даних автоматично. Кнопка "Вийти з бази даних" перериває роботу програми та дозволяє вийти з неї. Схема зв'язків інформації, що вводиться в базу даних (рис. 2), показує, які типи відносин існують між окремими таблицями, що складають структуру цієї бази даних.

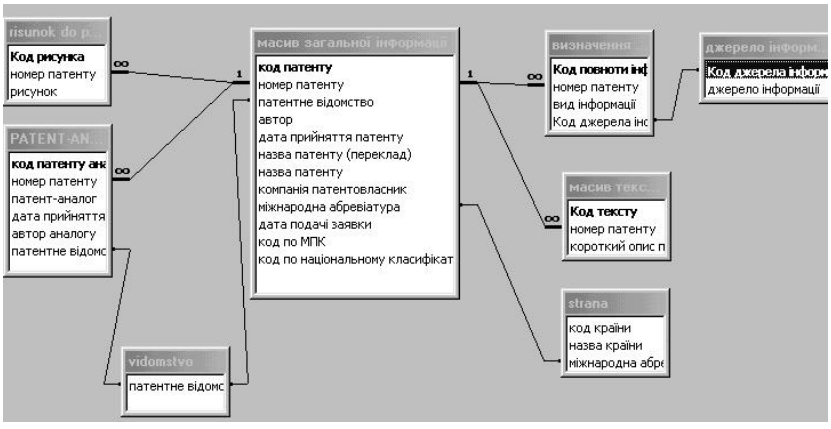


Рисунок 2 – Структура зв'язків бази даних патентів

Для полегшення операцій вводу значень записів використовується поле, яке має список, що дозволяє вибрати з нього одне із допустимих значень або безпосередньо ввести значення в поле. За допомогою поля зі списком (рис.3) ми можемо ввести назву патентного відомства, код країни, іншу інформацію.

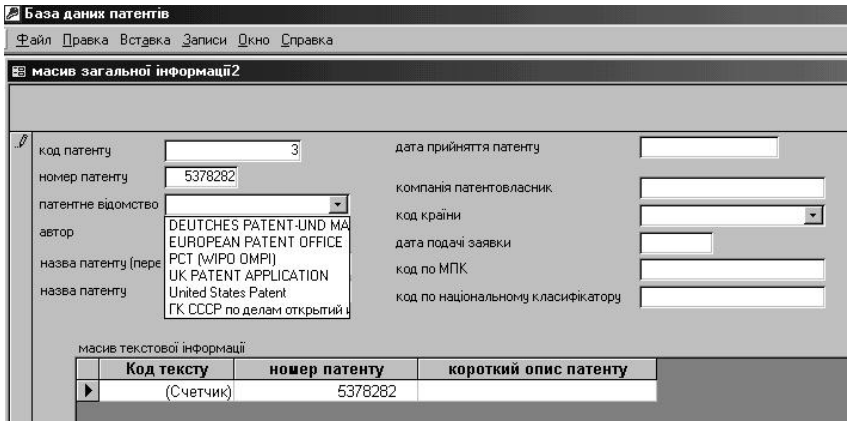


Рисунок 3 – Ввід інформації в масив загальної інформації з використанням полів із списком

При перегляді даних використовується режим форми, який дозволяє обмежити об'єм інформації, що відображається на екрані, і представляти її в потрібному вигляді. При цьому перегляд інформації можна здійснювати в почерговому і вибірковому представленні. Так при вводі патентів-аналогів використовується підлегла форма "патенти-аналоги" (рис. 4). В ній вказується номер патенту, дата його реєстрації, автор та в якому патентному відомстві він зареєстрований.

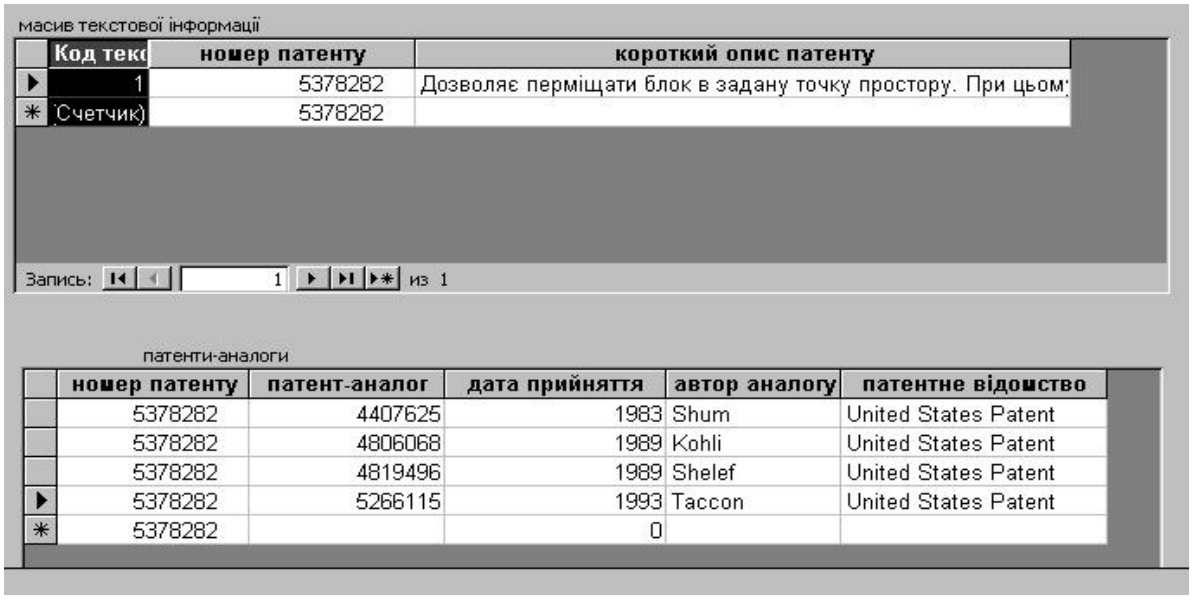


Рисунок 4 – Підлеглі форми "масив текстової інформації" та "патенти-аналоги"

Для забезпечення повноти інформації бажаною є графічна інформація стосовно патенту.

Для завершення вводу інформації про патент необхідно вказати ступінь повноти інформації (повна, часткова, обмежена), та її джерело. Ця інформація відноситься до блоку "визначення повноти інформації". Для пошуку необхідної інформації застосовуємо фільтри, які дозволяють здійснювати пошук у відповідності до ідентифікаційних кодів, по ключових словах, джерелах інформації чи символу, що підставляється. Фільтр при цьому буває двох режимів: звичайний і розширений. В режимі розширеного фільтра можна проводити не тільки фільтрацію, але одночасно і сортування по зростанню чи спаданню по декільком полям одночасно. Це дозволяє проводити якісний аналіз отриманої інформації при прогнозуванні.

Як відомо, одним із основних призначень БД є швидке отримання інформації по питанню, що цікавить. Для цього створюють спеціальні запити, які дозволяють: сформувати складні критерії для вибору записів із однієї чи декількох таблиць; вказати поля, які повинні відображатися для вибраних записів; провести обчислення з використанням вибраних даних, якщо це потрібно (рис. 5).

N patenta	god	strana	№ patenta-anal	god
3559936	1971	usa	2344454	1944
3559936	1971	usa	2408169	1946
3559936	1971	usa	3295224	1967
3645011	1972	usa	2787842	1957
3645011	1972	usa	3281962	1966
3645011	1972	usa	3451146	1969
3645011	1972	usa	3295224	1967
3645011	1972	usa	3304628	1967
3952979	1976	usa	3288421	1966
3952979	1976	usa	3295224	1967
3952979	1976	usa	3464657	1969
3952979	1976	usa	3483951	1969
3952979	1976	usa	3577659	1971

Рисунок 5 – Фрагмент звіту “вибір патентів-аналогів” бази даних патентів верстатів з паралельною кінематикою

Вибір записів можна провести по діапазону значень або по вибраному простому критерію. На основі вибраних записів створюється звіт (рис. 6) в якому представлена інформація про патент (авторське свідоцтво).

номер патенту	5651574	**назва патенту (переклад)**	Мікроманіпулятор
патентне відомство	United States Patent	**код по МПК**	b25j 15/08
автор	Tanikawa	**код по НК**	294/735; 414/739; 901/29; 901/34; 901/3
дата прийняття патенту	29-Лип-97		

патент-аналог	дата прийняття	автор аналогу	патентне відомство
5114300	1992	Shahinpoor	United States Patent
5053687	1991	Merlet	United States Patent
4850631	1989	Dotsko	United States Patent

Рисунок 6 – Фрагмент звіту “Патенти та патенти-аналоги”

У створеній БД містяться відомості про більше як 200 патентів і авторських свідоцтв на компоновочні рішення і конструкції верстатів з паралельною кінематикою, їх вузли, схеми, принцип дії, а також про більше як 1100 патентів-аналогів.

Прогнозування на основі використання патентної інформації дозволяє виявити які ідеї на теперішній час є прогресивними і перспективними, а які є застарілими. Після зародження нової ідеї і появи перспективного винаходу відбувається зосередження винахідницької діяльності на цій ідеї. З’являються у зростаючій кількості нові винаходи, що стосуються різних способів, пристроїв і конструкцій, для реалізації цієї ідеї. Але починаючи з певного моменту винахідницька активність в певному напрямку поступово зменшується, оскільки можливості ідеї вичерпуються. Новий якісний скачок можливий при появі нових піонерських ідей.

На основі отриманого з БД звіту проведено аналіз росту кількості патентів по роках (рис. 7).

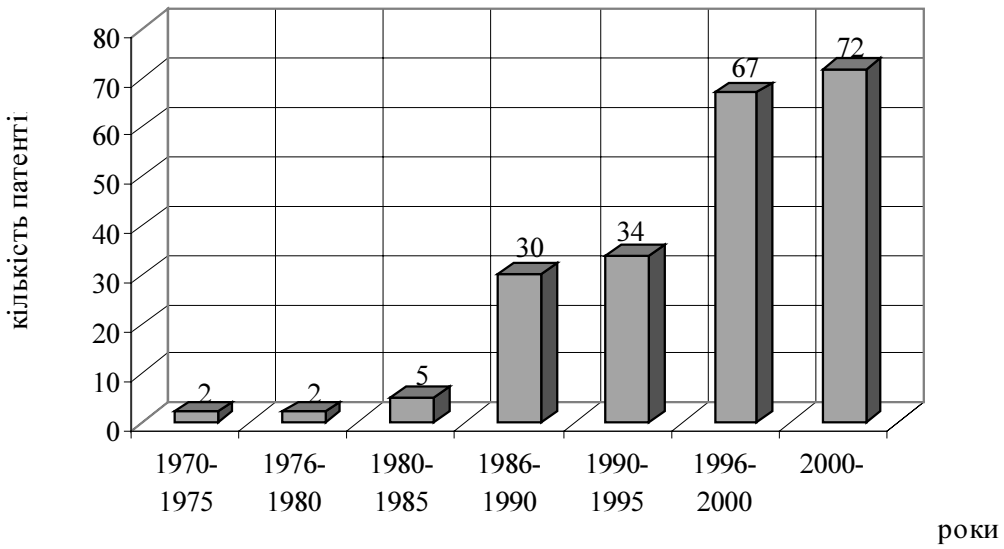


Рисунок 7 – Динаміка патентування по роках (часовий інтервал 5 років)

Згідно прогнозу на період з 2003 на кінець 2008 року слід очікувати появи не менше 110 нових патентів. Тобто патентна активність зростатиме. Кількість патентів за цей період в порівнянні з 1995-2000 роком може подвоїтись. При появі нової піонерської ідеї, можна очікувати ще більшого росту числа патентів в даній галузі.

На основі аналізу звіту по БД було виявлено, що перші патенти, які опосередковано стосуються верстатів з паралельною кінематикою з'явились в 1970-1980 роках (рис. 8). Вони в основному відносяться до пристроїв для симуляції руху в деяких технічних системах. Період з 1985 по 1995 рік характеризується зростанням кількості патентів, що стосуються роботів та маніпуляторів. З 1995 року різко зростає кількість патентів по конструкціях верстатів з паралельною кінематикою, а також системах позиціювання та методах контролю.

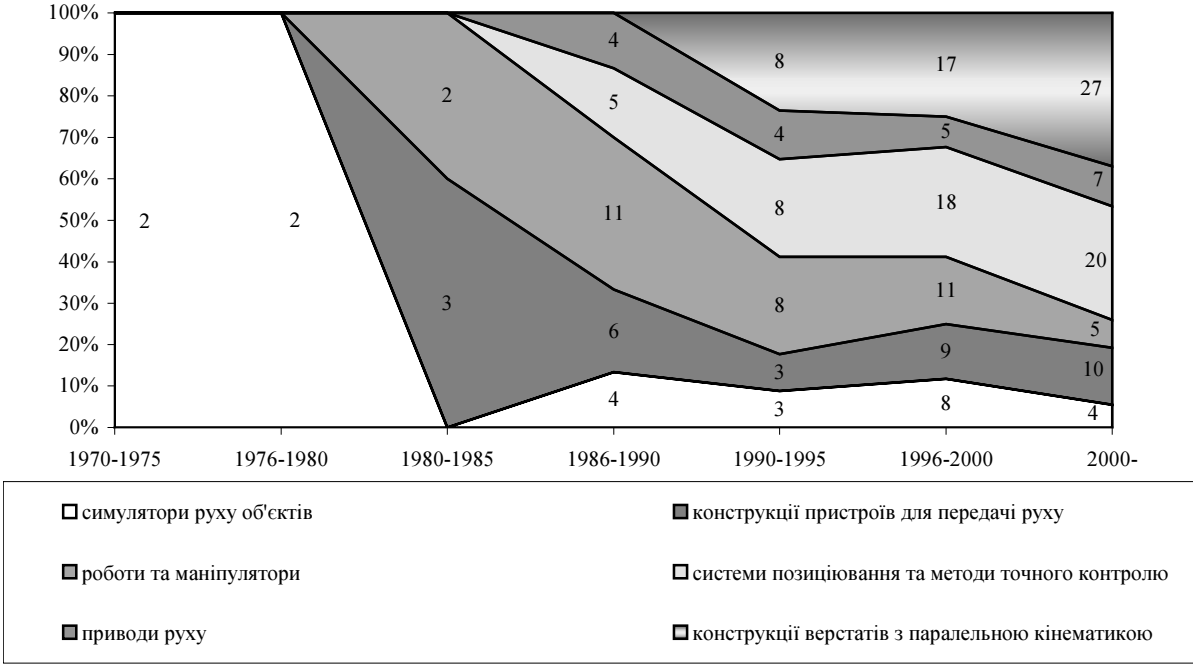


Рисунок 8 – Динаміка зміни винахідницької активності стосовно верстатів з паралельною кінематикою

Як видно із (рис. 8) за останні роки винахідницька активність по роботам та маніпуляторам, симулятори руху об'єктів знизилась, спостерігається чітка тенденція росту в області патентування конструкцій верстатів з паралельною кінематикою, системи позиціювання та методів точного контролю. Потрібно сподіватись появи великої кількості нових патентів в цій області в найближчі 10-12 років. На попередньому рівні залишилась кількість патентів в області приводів руху та конструкцій пристроїв для передачі руху.

Висновки

1. Створена база даних може представляти значний інтерес для підприємств та організацій, які займаються проектуванням та виготовленням верстатів з паралельною кінематикою.

2. Сформована БД дозволяє проводити аналіз динаміки патентування та виявити найбільш перспективні напрямки розвитку верстатів з паралельною кінематикою (за кількістю патентів).

Список літератури

1. Чабровский В.А. Прогнозирование развития науки и техники.- М.: Экономика, 1983.- 152с.
2. Зборовский И.Ю. Исследование развития техники по патентным материалам // Анализ тенденций и прогнозирование научно-технического прогресса.- К.: Наукова думка.- 1967.- С. 72-81.
3. Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Валявський І.А., Скляров Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. / Під ред. Ю.М. Кузнєцова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.

УДК 629.7.016

Д.К. Мещишен
Кіровоградська державна льотна академія

Дослідження зміни тягових характеристик авіаційних двигунів протягом тривалої експлуатації

У статті розглянуто питання зміни тягових характеристик авіаційних двигунів протягом тривалої експлуатації у контексті проблеми глобального старіння авіаційних парків України і Російської Федерації та необхідності вдосконалення діючих процедур підтримання льотної придатності
авіаційна техніка, льотна придатність, ресурс, аеродинамічні та дросельні характеристики, авіаційний двигун

Сучасне фінансово-економічне становище авіапідприємств України і Російської Федерації не дозволяє їм своєчасно обновляти парк повітряних суден (ПС) новими зразками авіаційної техніки (АТ). Переважна більшість авіапідприємств експлуатують старі зразки АТ, що були вироблені ще у колишньому СРСР, або придбають теж далеко не нову зарубіжну техніку. Практично усі авіаперевезення виконуються на ПС з продовженими міжремонтними ресурсами і строками служби [1]. Єдиним шляхом підтримання льотної придатності є продовження ресурсу тих ПС, що залишаються в експлуатації. З року в рік ця проблема загострюється [2]. Процедура продовження ресурсу ПС стала основним засобом виживання авіапідприємств. У таких умовах безпечна подальша експлуатація ПС прямо залежить від повноти, об'єктивності та якості робіт по продовженню ресурсу. Але на практиці можна спостерігати протилежну ситуацію, коли ресурси при індивідуальному продовженні набагато перевищують ресурси, що призначені для всього парку. Така ситуація характерна для малих компаній, яки не мають власної виробничо-технічної бази [3]. Фінансова неспроможність таких підприємств не дозволяє їм виділяти достатньо коштів на підтримання льотної придатності, що приводить до необгрунтованого продовженню ресурсу натомість проведенню повного комплексу робіт [4, 5]. В умовах глобального старіння авіапарку та необхідності підтримання льотної придатності ПС, що залишаються в експлуатації, особливо актуальною і невідкладною є проблема розробки ефективних методик всебічного контролю льотної придатності ПС та особливо тих зразків, експлуатація яких ведеться за межами призначеного терміну служби [6]. В даний час ця проблема не має свого належного рішення внаслідок відсутності програм продовження ресурсу ПС з врахуванням не тільки міцності планеру, але й його аеродинамічного стану, що потребує невідкладних рішучих дій по підвищенню надійності експлуатації авіапарку [3, 7].

Згідно вимог льотної придатності [8] діапазон льотних обмежень розраховується на підставі поляр літака $c_y = f(c_x)$, залежностей коефіцієнта підйомної сили від кута атаки $c_y = f(\alpha)$ і залежностей тяги авіадвигунів від швидкості та висоти польоту $P = f(V, H)$. Проблемі змінювання поляр літака $c_y = f(c_x)$ та залежностей $c_y = f(\alpha)$ були присвячені дослідження, результати яких були опубліковані у роботах [9, 10]. Ця стаття продовжує розвивати тему розробки методики контролю фактичного діапазону льотних обмежень ПС шляхом дослідження впливу тривалої експлуатації на дросельні характеристики авіадвигунів $P = f(V, H)$ тому що авіадвигун, що протягом тривалого часу знаходився в експлуатації, не може в повному обсязі відповідати заданим технічним вимогам.

© Д.К. Мещишен. 2004

Загальним недоліком діючих програм продовження ресурсу ПС є відсутність оцінки фактичних дросельних характеристик авіадвигунів. Тривала експлуатація супроводжується недостатньо якісним обслуговуванням та ремонтом, а також переліком несприятливих факторів оточуючого середовища, що неминуче приводить до наступних наслідків:

– погіршення газодинамічних характеристик газоповітряного тракту двигуна;

– погіршення характеристик вузлів регулювання параметрів роботи двигуна;

– збільшення енергетичних втрат за рахунок люфтів і тертя у вузлах двигуна тощо.

Одночасно з розробкою методики оцінки аеродинамічного стану ПС, для оцінки впливу тривалої експлуатації на тягові характеристики двигуна, було проведено відповідне дослідження. Для реалізації методики в експлуатаційних умовах, дослідження було зорієнтовано тільки на можливості бортової вимірювальної апаратури. Експериментальною базою було обрано ПС Ан-24 і Ан-26 з двигунами АІ-24 2-ї серії і АІ-24 ВТ в зв'язку з тим , що

– двигуни цих літаків, як і самі літаки, перебувають на заключному етапі експлуатації;

– даний тип ПС обладнано бортовим реєстратором польотної інформації типу МСРП-12-96, котрий має найменшу точність та перелік параметрів, що реєструються. Вдала реалізація методики на прикладі МСРП-12-96 гарантує можливість її застосування стосовно інших типів ПС, з реєстраторами даного типу або більш сучасних модифікацій.

За допомогою МСРП-12-96 можуть бути відновлені характеристики $P = f(V, H)$ оскільки перелік параметрів, що реєструються, налічує барометричну висоту, приладову швидкість та тиск мастила у вимірювачі моменту на валу двигуна. Останній параметр дозволяє розрахувати фактичну тягу двигуна наступним чином. Результуюча тяга силової установки дорівнює сумі тяг лівого та правого двигунів. Тяга одного двигуна АІ-24 є

$$P_{дв} = \frac{N_в}{V}\eta_в + P_р = \frac{kn_{дв}\mu}{V}\eta_в + P_р, \qquad (1)$$

де $N_в$ - гвинтова потужність;

$\eta_в$ – коефіцієнт корисної дії повітряного гвинта АВ-72;

$P_р$ - реактивна тяга газового струменю;

k - постійний коефіцієнт, що залежить від характеристик редуктора;

$n_{дв}$ - частота обертання ротора двигуна, що дорівнює 15100 об/хв для АІ-24 2-ї серії і 15800 об/хв для АІ-24ВТ на всіх режимах роботи двигуна;

μ - тиск мастила у вимірювачу моменту на ротору двигуна.

Характеристики двигунів АІ-24 2-ї серії і АІ-24ВТ позначимо відповідно індексами "2" і "ВТ". З урахуванням значень k и $n_{дв}$ для АІ-24 2-ї серії і АІ-24ВТ гвинтова потужність відповідно є $N_в^{(2)} = 19306\mu\eta_в$ і $N_в^{(BT)} = 20201\mu\eta_в$. Тоді, тяга повітряного гвинта відповідно дорівнює $P_в^{(2)} = \frac{19306}{V}\mu\eta_в$ і $P_в^{(BT)} = \frac{20201}{V}\mu\eta_в$. З графіків залежностей $P_{дв} = f(V)$ і $P_в = f(V)$ для АІ-24 2-ї серії і АІ-24ВТ, наведених у [11, 12] легко бачити, що $\frac{P_{дв}}{P_в} = 1{,}1$. Тоді, тяга двигуна дорівнює $P_{дв}^{(2)} = 1{,}1P_в = \frac{21237}{V}\mu\eta_в$ і $P_{дв}^{(BT)} = 1{,}1P_в = \frac{22221}{V}\mu\eta_в$.

Якщо $P_р = P_{дв} - P_в = 0{,}1P_в$, то з урахуванням (1) одержуємо вираз для результатної тяги силової установки для ПС Ан-24 і Ан-26 з двигунами АІ-24 2-ї серії і АІ-24ВТ

$$P_{\Sigma}^{(2)} = 2P_{дв}^{(2)} = \frac{21237(\mu_1 + \mu_2)}{V}\eta_в \text{ і} \quad (2)$$

$$P_{\Sigma}^{(BT)} = 2P_{дв}^{(BT)} = \frac{22221(\mu_1 + \mu_2)}{V}\eta_в, \quad (3)$$

де μ_1 і μ_2 - тиск мастила у вимірювачах моменту на валу лівого і правого двигунів.

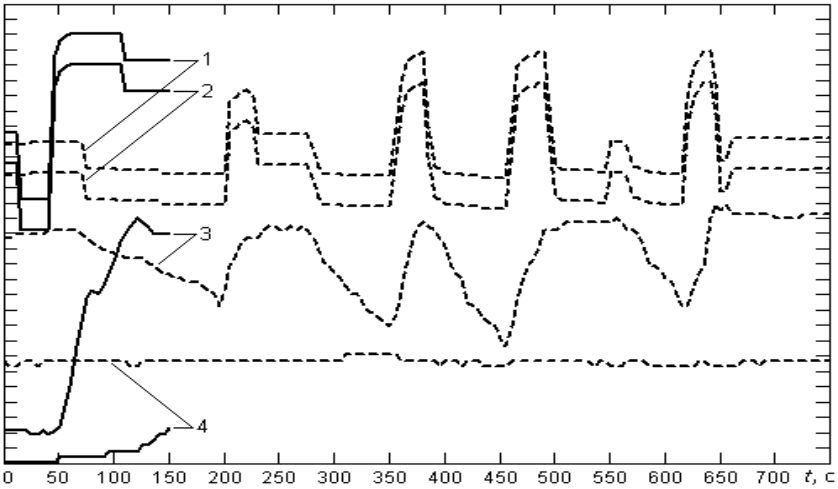
Враховуючи, що більшість двигунів взагалі і двигуни АІ-24 зокрема мають лінійну форму залежності $P_в = f(H)$ [13], можна стверджувати, що для висновку щодо змін залежності $P_в = f(H)$ достатньо проконтролювати тягу на двох окремих висотах. Далі ми зможемо екстраполювати отримані значення зміни тяги на весь діапазон висот.

Розрахунок фактичних тягових характеристик двигуна має проводитися тільки на максимальних режимах роботи останнього, тому що відносно невелику різницю між типовими і фактичними значеннями тяги можливо зафіксувати тільки як різницю між максимальною фактичною тягою і максимальною тягою згідно технічної документації двигуна. На нижчих режимах роботи ця різниця може бути компенсована незначним змінюванням положення важелів керування двигунами у напрямку збільшення подачі палива, яке буде непомітно для бортового реєстратора польотної інформації у зв'язку з його обмеженою точністю реєстрації. Для аналізу було вирішено проаналізувати зміни тяги на найбільш можливих діапазонах змін швидкостей польоту у землі, тобто при H=0 при виконанні зльоту, та на H=2400 м при виконанні навчально-тренувальної вправи тому, що

– єдиний експлуатаційний режим, який дає змогу пройти найбільший діапазон швидкостей польоту при максимальному режимі роботи двигунів у землі - це зліт літака;

– метою навчально-тренувальної вправи є відпрацювання навичок пілотування на мінімально можливих швидкостях польоту, що не зустрічаються у нормальної експлуатації.

Експериментальні польоти були виконані при атмосферних умовах, за яких було виключено спрацьовування системи обмеження граничної температурі вихлопних газів ПРТ-24 шляхом примусового зниження потужності двигунів. Усі польоти було виконано на аеродромі м. Кіровограда при атмосферному тиску 740…750 мм рт.ст. при температури оточуючого повітря не більш ніж +20 ºС. На рисунку 1 наведено приклад змінювання параметрів H, V і μ при виконанні злету та навчально-тренувальної вправи.



1, 2 – тиск мастила у вимірювачах моменту на ротору відповідно лівого та правого двигунів;
3 - приладова швидкість польоту; 4 - барометрична висота польоту.

Рисунок 1 - Осцилограми змінювання параметрів польоту у процесі зльоту (суцільні лінії) та при виконанні навчально-тренувальної вправи (штрихові лінії)

За даними польотної інформації, згідно формул (2, 3) були одержані значення тяги двигунів при відповідних значеннях дійсних швидкостей польоту. Далі, усі розраховані значення фактичної тяги двигунів були приведені до стандартних атмосферних умов за допомогою загальновідомого методу диференціальних поправок [14]. Щодо розглянутого випадку, приведена тяга двигунів дорівнює:

$$P_{пр} = P_{ф} + \Delta P,$$

$$\Delta P = P_T \frac{P_{ф}}{T} \Delta T + P_P \frac{P_{ф}}{P} \Delta p,$$

де $P_{пр}$, $P_{ф}$ - відповідно фактична та приведена тяга двигунів;

T - фактична температура оточуючого повітря;

P - фактичний атмосферний тиск;

ΔT- відхилення фактичної температури повітря від стандартної;

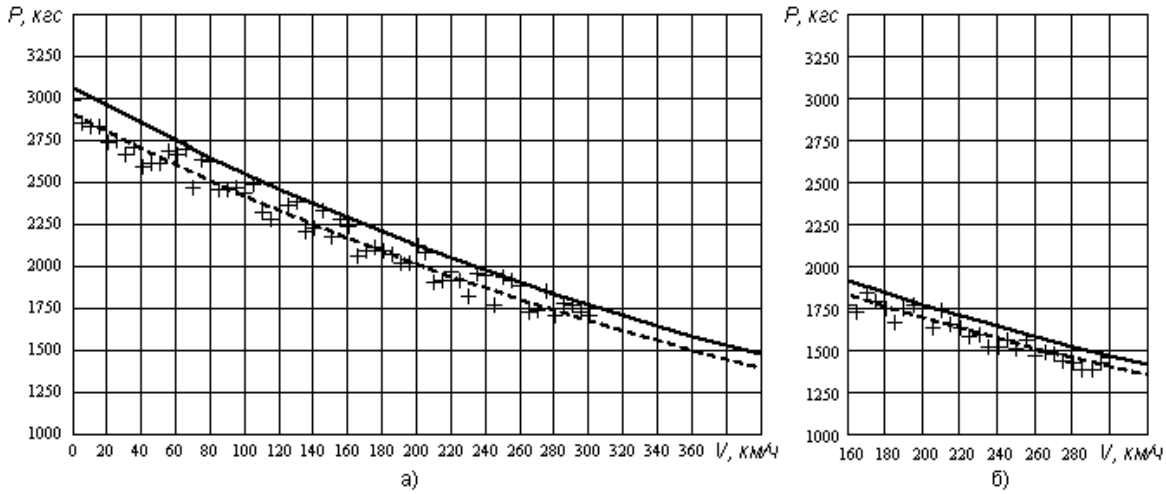
Δp - відхилення фактичного тиску від стандартного;

P_T - безрозмірний коефіцієнт, що встановлює на скільки відсотків змінюється тяга двигуна при зміні температури повітря на 1%;

P_P - безрозмірний коефіцієнт, що встановлює на скільки відсотків змінюється тяга двигуна при зміні атмосферного тиску на 1%.

Отримані експериментальні значення тяги силової установки були апроксимовані за допомогою метода найменших квадратів експоненціальною залежністю виду $P_{\Sigma} = b_0 e^{-b^1 V}$, де b_0 і b_1 – коефіцієнти апроксимації.

На рисунку 2 наведено результати проведеного експерименту.



____ - значення тяги двигунів АІ-24 2-ї серії, регламентовані технічною документацією;

+++ + - фактичні значення тяги двигунів АІ-24 2-ї серії, отримані експериментально;

- - - - -апроксимовані значення фактичної тяги двигунів АІ-24 2-ї серії.

Рисунок 2 - Результати розрахунків фактичної тяги силової установки літака Ан-24 у процесі зльоту (а) та при виконанні навчально-тренувальної вправи (б)

Максимальна тяга силової установки застосовується у процесі зльоту літака, тому зниження тяги силової установки, яке було помічено у результаті проведеного експерименту, відображається перш за все на зльотних характеристиках наступним чином:

– швидкість прийняття рішення зменшується на 3 – 5 км/год;

– дистанція розбігу збільшується на 50 – 100 м;

– дистанція етапу повного зльоту збільшується на 300 – 400 м;

– градієнт набору висоти на усіх етапах повного злету зменшується на 1 – 2 %.

Таким чином , тривала експлуатація двигуна має помітний вплив на загальні льотні характеристики літака. Тому, при розробки методики контролю аеродинамічного стану літака обов'язково слід враховувати можливість зниження потужності авіадвигунів внаслідок тривалої експлуатації.

Список літератури

1. О совершенствовании организации и качества ремонта гражданских воздушных судов в авиаремонтных организациях гражданской авиации в соответствии с "Основами политики Российской Федерации в области авиационной деятельности". Постановление Совета ГСГА Минтранса России от 24.10.2001 № 11.
2. Об итогах социально-экономического развития гражданской авиации за 2002 год и задачах на 2003 год. Постановление Совета ГСГА Минтранса России от 20.02.2003.
3. О мерах по упорядочению эксплуатации воздушных судов в гражданской авиации. Распоряжение МТ РФ от 18.12.00 № НА-449-р.
4. Итоги работы гражданской авиации за 2000 год и задачи на 2001 год. Постановление Совета ГСГА Минтранса России от 14.02.2001 № 4.
5. Об итогах работы гражданской авиации за 2001 год и задачах на 2002 год. Постановление Совета ГСГА МТ РФ (Росавиации) от 6.02.2002 № 1.
6. Анализ состояния безопасности полётов в гражданской авиации Украины за 1997 г. Государственная администрация авиационного транспорта Украины (Укравиация). Главная инспекция по безопасности полётов. 13.02.98. № 23.23-01.
7. Космос и авиация: возможности и перспективы международного сотрудничества. Петербургский экономический форум "Взгляд в будущее России", 2000. АСМО-пресс.
8. Нормы лётной годности гражданских самолётов СССР.2-е изд.-М.: ЦАГИ, 1974.-304 с.
9. Белогузов В.С., Мещишен Д.К. Методика снятия фрагментов поляр самолёта по данным борового регистратора в условиях предприятия гражданской авиации // Вісник Національного Авіаційного Университету. - Київ: НАУ. - 2000. Вип. 3-4(7). - С. 109 -113.
10. Білогузов В.С., Мещишен Д.К. Розробка математичної моделі процесу зміни аеродинамічних характеристик літака протягом тривалої експлуатації // Вісник Національного Авіаційного Университету. – Київ: НАУ. – 2001. Вип. 3(10). – С. 66 – 70.
11. Самолёт Ан-24. Техническое описание: В 7-и кн./– М., 1969.– Кн. 1: Лётно-технические характеристики самолёта. – 75 с.
12. Самолёт Ан-26. Техническое описание: В 4-х кн./ – М., 1976.– Кн. 1: Лётно-технические характеристики самолёта. – 26 с.
13. Интерполяция функций нескольких переменных при наличии ограничений на область их существования применительно к определению на ЭВМ аэродинамических характеристик летательного аппарата и тягово-расходных характеристик его двигателя /Баранова З.П., Каргопольцева Н.А., Ручьёв В.М. -Труды ЦАГИ, 1979, вып.2004, -С. 1-13.
14. Лётные испытания самолётов / М.Г.Котик, А.В.Павлов, И.М.Пашковский, Н.Г.Щитаев. – М.: Машиностроение, 1968. - 423 с.

УДК 621.941

Ю.М. Кузнєцов, проф., д-р техн. наук, Т.О. Хамуйела
НТУУ "Київський політехнічний інститут"
В.А. Крижанівський, проф., д-р техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Системно-морфологічний підхід при створенні затискних пристроїв для затиску призматичних заготовок

В статті розглянута ієрархія опису і схемний синтез затискних пристроїв на прикладі лещат за допомогою методу морфологічного аналізу, наведені морфологічні таблиці і матриці, які дозволяють отримати оригінальні рішення лещат з двома кінематичними ланцюгами на рівні винаходів.
затискний пристрій, морфологічний аналіз, лещата

Основну групу технологічного оснащення складають пристосування механоскладального виробництва, серед яких найбільше розповсюдження отримали пристрої для затиску призматичних заготовок, зокрема, машинні і слюсарні лещата (Л) [1, 3, 7, 8].

Лещата призначені для затиску заготовок і деталей на різних верстатах (свердлильних, фрезерних, агрегатних, багатоопераційних, деревообробних), а також для слюсарних робіт.

Лещата класифікуються по різним ознакам (рис. 1) до яких пред'являються наступні вимоги:

1. При затиску не повинно порушуватися положення об'єкта затиску (ОЗ), тобто вимога по точності положення ОЗ по трьох координатних вісях у статиці і сталої сили затиску.

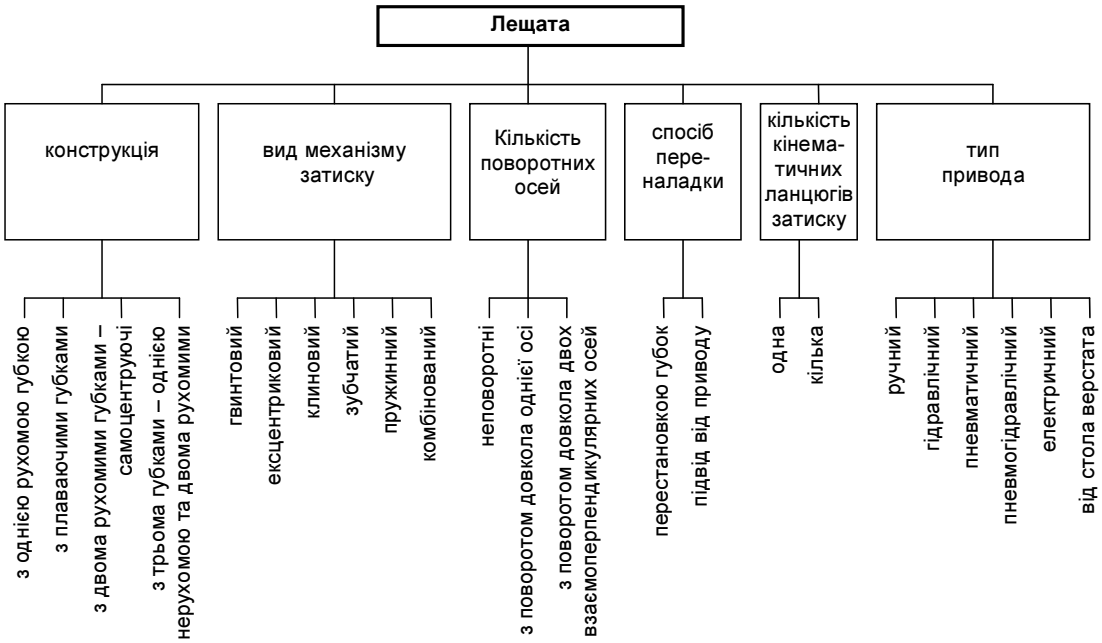


Рисунок 1 – Класифікація лещат

© Ю.М. Кузнєцов, Т.О. Хамуйела, В.А. Крижанівський. 2004

2. Затиск не повинен викликати деформації і псування ОЗ, зминання його поверхонь, тобто необхідна сила закріплення, повинна враховувати пружні характеристики елементів і контактну жорсткість в стиках.

3. Сила затиску повинна бути мінімальною, але достатньою для надійного закріплення, що виключає зсув, обертання та вирив ОЗ від дії сил різання. Відхилення механічних характеристик і розмірів ОЗ, затуплення інструмента, сил тертя в затискних елементах враховуються коефіцієнтом запасу затиску $K_{зап}$.

4. Затиск-розтиск ОЗ повинний виконується при мінімальних витратах часу та енергії як механічної, так і енергії людини, тобто Л повинні мати просту конструкцію, бути зручними в обслуговуванні, міцними, довговічними, компактними, технологічними, а також мати достатній коефіцієнт підсилення $K_{підс}$ при використанні ручного затиску.

Сучасні ринкові відносини вимагають випуск нової конкурентноздатної продукції, що володіє, крім основних вимог, комплексом додаткових і спеціальних вимог: швидка змінність і переналагоджуваність, легкість регулювання, мінімальні габарити, захищеність, ремонтопридатність, можливість автоматичного регулювання параметрів затиску, безшумність, безпечність, економічність, агрегатно-модульний принцип побудови та уніфікація базових деталей.

Пошук нових структурно-схемних рішень затискних пристроїв можна здійснювати, використовуючи системно-морфологічний підхід [4-6], до якого відноситься метод морфологічного аналізу, спрямований на послідовний перебір усіх можливих варіантів рішення. Цей метод включає п'ять послідовних етапів [5]:

– точне формулювання задачі, яка відображає основну вимогу до об‘єкту;

– розподіл об'єкту на функціональні елементи з складанням списку усіх морфологічних ознак і вимог до них, тобто усіх важливих характеристик об'єкту, його параметрів, від котрих залежать рішення проблеми і досягнення основної мети;

– незалежний розгляд усіх елементів і вибір для кожного повного набору різних варіантів реалізації, тобто складання усіх можливих варіантів за кожною характеристикою незалежно і побудова морфологічної моделі;

– аналіз функціональної цінності рішень, які виникають з матриці визначенням цінностей усіх одержаних варіантів конкретних рішень, тобто вибір кращих сполучень згідно заданого критерію [6].

До загальної структури Л входять пружні, допоміжні елементи, затискні елементи і передатно-підсилювальні ланки. Усі вищевказані структурні елементи зв‘язані між собою за допомогою кінематичних, фрикційних, пружних та інших зв‘язків.

Порядок передачі затискних зусиль від одного елемента до іншого може бути різним, що значно впливає на конструкцію Л, їх характеристики, зокрема, на $K_{підс}$ механізму, що затискує.

Усе вищесказане викликає необхідність розгляду структурних схем Л. Процес затиску деталі в Л проходить у два етапи:

1. Вибірка зазорів (попередній затиск).

2. Остаточний затиск.

Ці два етапи можуть бути сполучені (для випадків, коли затискний момент, що крутить, один, тобто структура одноходова) і роздільні (коли структура двоходова). З огляду на це, структурні схеми Л діляться на: одноходові і двоходові.

Треба зазначити, що одноходові Л нераціональні тому що робочі і холості ходи виконуються з однаковою (повільною) швидкістю, необхідність використання приводу завищеної потужності, швидкий знос різьб і затискних елементів, низький коефіцієнт

підсилення затиску (КПЗ), великий габарит, обґрунтовує необхідність створення Л з двома кінематичними ланцюгами.

Розглянемо структурні схеми Л за допомогою аналізу кінематичних ланцюгів. Таких ланцюгів може бути один, два або декілька [2]. З‘єднуватися вони можуть паралельно, послідовно або паралельно-послідовно (табл. 1).

Варто зауважити, що кінематичні пари, що входять у кінематичний ланцюг, можуть одночасно належати до іншого кінематичного ланцюга, тобто кінематичні ланцюги можуть перетинатися і два кінематичні ланцюги цілком можуть мати паралельно-послідовне з‘єднання. Один кінематичний ланцюг може містити в собі окремі ланки іншого або ж цілком містити в собі інший ланцюг.

Таблиця 1 – Морфологічна таблиця кінематичних ланцюгів Л

1. Кількість входів	2 . Кількість ланцюгів	3. Вид з'єднання	4. Місце сумування рухів
1.1 один 1.2 два 1.3 більше двох	2.1 один 2.2 два 2.3 більше двох	3.1 паралельне 3.2 послідовне 3.3 паралельно-послідовне	4.1 на вході 4.2 на виході 4.3 на вході і на виході 4.4 нема

Морфологічна таблиця кінематичних ланцюгів (табл. 1) дозволяє синтезувати множину схем структур Л, яка може представити у вигляді морфологічної матриці структур, якщо позначити елементи табл. 3.1 через відповідну нумерацію альтернатив:

$$\begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 \\ 1.3 & 2.3 & 3.3 & 4.3 \\ & & & 4.4 \end{vmatrix} \quad (1)$$

Для отримання структур Л необхідно взяти по одній альтернативі з кожного стовпчика матриці. Утворені у такий спосіб схеми підлягають усебічному розгляду і аналізу з побудовою морфологічної таблиці кінематичних схем Л (табл. 2).

Побудовою схем Л не закінчується їхній аналіз, кожний кінематичний ланцюг перебуває з конкретних пар ланок і зв'язків між ними.

Як самі "ланки" (через "їхні геометричні" розміри, використаний матеріал), так і характер зв'язків між ними значно впливають на вихідні характеристики Л.

Для розрахунку $K_{\text{підс}}$ лещат необхідно кожний кінематичний ланцюг записати або словесно, або за допомогою символів як деяку послідовність пар ланок із визначеним характером зв'язку (різь, тертя кочення, тертя ковзання).

Звичайно, було б ідеально записувати кінематичний ланцюг Л по принципу запису кінематичних ланцюгів приводів верстатів, тобто записувати передатні відношення кожної пари ланок, але у зв'язку з розмаїтістю конструктивних рішень не буде ясно, яка саме пара стоїть за цим числом і, отже, такий підхід не є доцільним.

Наявні раніше структурно-морфологічні матриці не відбивають саме структурно-функціональну схему Л, вони можуть дати інформацію про вид передатних-підсилюючих ланок, затискних елементів, про зв'язки між елементами Л, але така формула не дає можливості простеження процесу передачі сили затиску від вхідних ланок до безпосередньо затискних елементів, а отже, ускладнює процес обчислення $K_{\text{підс}}$.

Вищесказане доводить необхідність побудови структурно-функціональних схем Л на підставі інформації про структурну схему кінематичних ланцюгів, а також види і послідовность з'єднання передатно-підсилювальних ланок. Передатно-підсилювальні ланки можуть бути: гвинтові, зубчаті, важільні, клинові, ексцентрикові [9, 10].

Таблиця 2 –Морфологічна таблиця схем лещат

Структура								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Корпус	1.1. Суцільний	1.2. Зіставний						
2. Затискні губки	2.1. Одна рухома та одна нерухома (виготовлена за одне ціле з корпусом)	2.2.Одна рухома та одна нерухома (умовно, виконує установчі переміщення, при обробці фіксується)	2.3.Плаваючі	2.4. Які самоустановлюються	2.5. Дві рухомі та одна нерухома			
3. Привод	3.1. Механізований	3.2.Ручний	3.3. Кілька приводів					
4. КЛ1 (установчих переміщень)	4.1. Важільний механізм	4.2.Гвинтовий механізм	4.3. Ексцентриковий механізм	4.4.Клино-плунжерний механізм	4.5.Зубчатий механізм	4.6.Черв'ячний механізм	4.7. Кілька послідовно з'єднаних механізмів	4.8. Відсутній
5.КЛ2 (швидкого підводу)	5.1.Важільний механізм	5.2.Гвинтовий механізм	5.3. Ексцентриковий механізм	5.4.Клино-плунжерний механізм	5.5.Зубчатий механізм	5.6.Черв'ячний механізм	5.7. Кілька послідовно з'єднаних механізмів	5.8. Відсутній
6. КП3 (силового натягу)	6.1.Важільний механізм	6.2. Гвинтовий механізм	6.3. Ексцентриковий механізм	6.4.Клино-плунжерний механізм	6.5.Зубчатий механізм	6.6.Черв'ячний механізм	6.7. Кілька послідовно з'єднаних механізмів	6.8. Відсутній

Зв'язки			
7.Корпус-губки	7.1.Пара ковзання	7.2.Пара кочення	
8.Губки-привод	8.1. є	8.2.Нема	
9.Губки-КЛ1	9.1. є	9.2.Нема	
10.Губки-КЛ2	10.1.є	10.2.Нема	
11.Губки-КЛ3	11.1.є	11.2.Нема	
12.Привод-КЛ1	12.1.Муфта з ручним перемиканням	12.2.Муфта з автоматичним перемиканням	12.3. Нема
13.Привод-КЛ2	13.1.Муфта з ручним перемиканням	13.2.Муфта з автоматичним перемиканням	13.3. Нема
14.Привод-КЛ-3	14.1.Муфта з ручним перемиканням	14.2.Муфта з автоматичним перемиканням	14.3. Нема
15.КЛ1-КЛ2	15.1.Муфта	15.2.Диференціал	15.3. Нема
16.КЛ1-КЛ3	16.1.Муфта	16.2.Диференціал	16.3. Нема
17.КЛ2-КЛ3	17.1.Муфта	17.2.Диференціал	17.3. Нема

Кожний кінематичний ланцюг може мати як одну передатну-підсилювальну ланку, так і декілька, причому природно, можливі комбінації використовуваних ланок.

Розрахуємо кількість варіантів побудов кінематичних ланцюгів при різній кількості використовуваних ланок та їх сполучень із повторенням (без обліку розташування) тобто кінематичний ланцюгів, що складається: з трьох ланок – містять в собі дві гвинтових ланки та одну клинову ланку: для цього скористаємося формулою кількістю сполучень із повторенням із n ланок по m ланок

$$C_{n(m)} = \frac{(m+n-1)!}{n!(m-1)}, \tag{2}$$

де n – порядковий номер кінематичного ланцюга.

m – кількість ланок.

Для кінематичного ланцюга, що має одну ланку $C_{1(5)} = 5$; дві ланки $C_{2(5)} = 15$; три ланки $C_{3(5)} = 55$; чотири ланки $C_{4(5)} = 70$; п'ять ланок $C_{6(5)} = 126$.

Загальне число структурно-функціональних схем дорівнює:

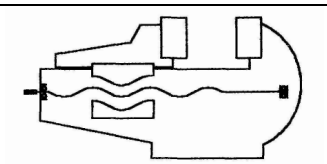
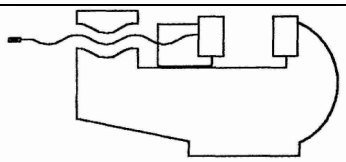
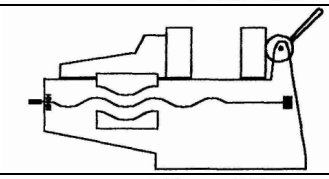
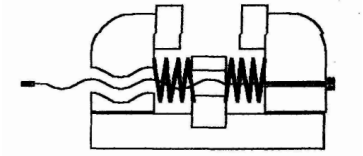
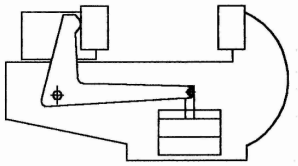
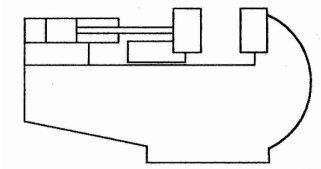
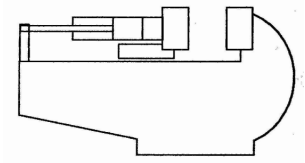
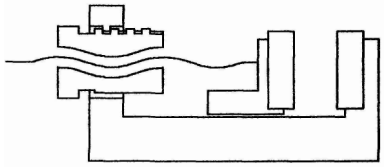
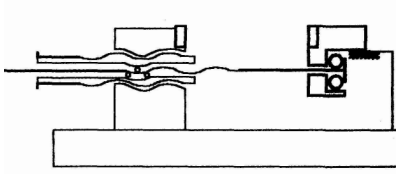
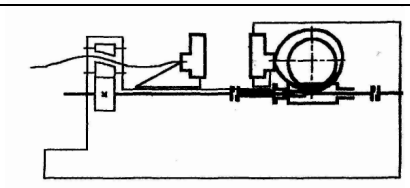
$$C_{кц} = \sum_{i=1}^{n} C_{кц_i} \tag{3}$$

Складемо та розглянемо матрицю структур кінематичних ланцюгів лещат та зв'язків між ними (табл. 3). За морфологічною матрицею можна скласти множину рішень кінематичних зв'язків в Л, які згодом можуть стати реальною конструкцією. Деякі з можливих схем нераціональні, або не мають змісту, інші повторюють реально існуючі конструкції, але мають місце і принципово нові рішення.

Виконаємо аналіз отриманих рішень.

Схеми №1 та №2 (табл. 3) являють собою звичайні Л з ручним приводом широко застосовувані в промисловості. Ці варіанти відмінні один від одного виконанням гвинтового затиску (тягнучий у варіанті №1, штовхаючий у варіанті №2). Схема №3 - Л з ексцентриковим затиском, які для розширення діапазону затискуваних розмірів заготовок обладнані гвинтовим механізмом який забезпечує хід нерухомої губки для попереднього налаштування на розмір (при обробці партії деталей). Схема №4 - Л з самовстановлюючимися губками. Схема №5 широко застосовується у швидкодіючих Л з пневмоприводом та підсилювальною ланкою у вигляді важільного механізму. Схеми №6 та №7 - Л з гідроприводом не потребують будь-яких додаткових підсилювальних ланок; відмінні один від одного виконанням приводу (нерухомий поршень у варіанті №6, рухомий в варіанті №7). Схема №8 - Л з пристроєм для швидкого підводу рухомої губки до затискуваної деталі, який являє собою втулку з поперечними пазами та фіксатором на корпусі. Повернувши втулку (вивівши один з пазів з зачеплення з фіксатором) можна вручну підвести її до затискуваної деталі для зіткнення, а потім повернувши знов зафіксувати. Остаточний затиск проводиться за допомогою гвинтового механізму. Схема №9 модифікація варіанта №1, де звичайний гвинтовий механізм замінено диференціальною гвинтовою парою завдяки чому при використанні лише одного з гвинтів можна підводити губку до затискуваної деталі на пришвидшеному русі. Ці Л мають два кінематичні ланцюги. Схема № 10 [11] - повністю механізовані Л з двома кінематичними ланцюгами, Вони оснащені кінематичним ланцюгом малих навантажень для швидкого підводу нерухомої губки до затискуваної заготовки та привод силового натягу оснащений черв'ячно-ексцентриковим підсилюючим механізмом. Завдяки цьому Л оснащуються тільки одним двигуном малої потужності. Перемикання між режимами виконується автоматично муфтами.

Таблиція 3 – Кінематичні схеми Л та їх морфологічні формули згідно табл. 2

№ п/п	Назва	Кінематична схема лещат	Морфологічна формула
1	Лещата з гвинтовим затиском		1.1-2.1-3.2-4.8-5.8-6.2-7.1-8.2-9.2-10.2-11.1-12.3-13.3-14.3-15.3-16.3-17.3
2	Лещата з гвинтовим затиском		1.1-2.1-3.2-4.8-5.8-6.2-7.1-8.2-9.2-10.2-11.1-12.3-13.3-14.3-15.3-16.3-17.3
3	Лещата з ексцентрико-вим затиском		1.1-2.2-3.2-4.2-5.8-6.3-7.1-8.2-9.1-10.2-11.1-12.3-13.3-14.3-15.3-16.3-17.3
4	Плаваючі лещата		1.2-2.4-3.2-4.2-5.8-6.2-7.1-8.2-9.2-10.2-11.1-12.3-13.3-14.3-15.3-16.3-17.3
5	Лещата з пневмо-приводом		1.1-2.1-3.1-4.8-5.8-6.1-7.1-8.2-9.2-10.2-11.1-12.3-13.3-14.2-15.3-16.3-17.3
6	Лещата з гідро-приводом		1.1-2.1-3.1-4.8-5.8-6.8-7.1-8.2-9.2-10.2-11.1-12.3-13.3-14.2-15.3-16.3-17.3
7	Лещата з гідро-приводом		1.1-2.1-3.1-4.8-5.8-6.8-7.1-8.2-9.2-10.2-11.1-12.3-13.3-14.2-15.3-16.3-17.3
8	Затискний пристрій		1.1-2.1-3.3(3.1)-4.8-5.2-6.2-7.1-8.2-9.2-10.2-11.1-12.3-13.2-14.2-15.3-16.2-17.1
9	Лещата з диффирен-ціально-гвинтовим затиском		1.1-2.1-3.3(3.1) 4.8-5.2-6.2-7.1-8.2-9.2-10.2-11.1-12.3-13.2-14.2-15.3-16.2-17.2
10	Лещата з двома кінематичним и ланцюгами		1.2-2.2-3.1-4.8-5.7-6.7-7.1-8.2-9.2-10.2-11.2-12.3-13.2-14.2-15.3-16.3-17.1

Лещата (схема №10) мають корпус, як базовий елемент у якому розташовується механізм затиску. Механізм затиску складається з двох губок рухомої та нерухомої. Чавунний корпус призматичної форми має прямокутні напрямні. Принцип дії Л засновано на тому, що попередній вибір зазору виконується нерухомою в процесі затиску губкою тому її привод є довгоходовим, який сприймає навантаження тільки в статиці, для чого варто використовувати гвинтову передачу з трапецеїдальною різзю, рухома губка має короткий хід (остаточний вибір зазорів), для її приводу доцільно використати малогабаритну ланку з великим коефіцієнтом підсилення, що може забезпечити ексцентрик.

Висновки

1. Розроблено методику системного підходу до аналізу та синтезу лещат.
2. Розроблено методику структурного синтезу лещат та синтезовано нові конструкції за допомогою морфологічного аналізу.
3. Створено нові структури лещат, які дозволяють значно знизити зусилля в режимах ручного затиску деталей в лещатах, при одночасному підвищенні рівня зусилля затиску деталі в лещатах меншого габариту.

Список літератури

1. Коваленко А.В., Подшивалов Р.Н. Станочные приспособления.– М.:Машиностроение, 1986. – 150 с.
2. Кожевников С.Н., Есипенко Я.И., Раскин Я.М. Механизмы. Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. / Под ред. С.Н. Кожевникова. – М.: Машиностроение, 1976. – 884 с.
3. Кузнецов Ю.И., Маслов А.Р., Байков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ. Справочник. – М.: Машиностроение, 1990.
4. Кузнєцов Ю.М. Теорія розв‘язання творчих задач. – К.: ТОВ "ЗМОК", "ГНОЗИС", 2003. – 294 с.
5. Одрин В.М., Картавов С.С. Морфологический анализ систем. Построение морфологических матриц. – К.: Наукова думка, 1977. – 183 с.
6. Самонастраивающиеся зажимные механизмы: Справочник / Ю.Н. Кузнецов, А.А. Вачев, С.П. Сяров, А.Й. Цървенков; Под ред. Ю.Н. Кузнецова. – К.: Техніка, София, Техника, 1988. – 222 с.
7. Станочные приспособления: Справочник в 2-х т. / Ред. совет: Б.Н. вардашкина (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1984. – Т1 / Под ред. Б.Н. Вардашкина, А.А. Шатилова. 1984 – 592 с.
8. Станочные приспособления: Справочник в 2-х т. / Ред. совет: Б.Н. вардашкина (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1984. – Т1 / Под ред. Б.Н. Вардашкина, В.В. Данилевского. 1984 – 656 с.
9. Турпаев А.И. Самотормозящие механизмы. – М.: Машиностроение, 1966. – 112 с.
10. Турпаев А.И. Винтовые механизмы и передачи. – М.: Машиностроение, 1984. – 223 с.
11. Патент України на винахід № 65425 А. Лещата. МПК B23Q 3/08. Опуб. 15.03.2004. Бюл. № 3.

УДК 621.9.62:62229.324

Ю.М. Кузнецов, Ф.В. Эль-дахаби
НТУУ "Киевский политехнический институт"

Системно-морфологический подход при синтезе высокоскоростных зажимных патронов

В статьи рассмотрен синтез высокоскоростных зажимных патронов с помощью системно-морфологического подхода, приведена морфологическая матрица схем зажимных патронов и новые варианты их конструкций.
токарный патрон, морфологический анализ, конструкция

Современные режущие инструменты оснащенные пластинами из твердых сплавов или сверхтвердых материалов, допускают высокую скорость резания, что требует высоких частот вращения шпинделя (до 6000-10000 мин$^{-1}$) современных металлорежущих станков с ЧПУ. Однако с увеличением частоты вращения шпинделя станка увеличивается действие на кулачки центробежных сил, которые уменьшают силу зажима кулачков почти в квадратной зависимости, ограничивая режимы резания, а, следовательно, снижение производительности станков и ограничение возможностей максимального использования их мощности. Поэтому требуется создание новых конструкций высокоскоростных зажимных патронов (ВСЗП), способных работать на высоких частотах вращения при сохранении необходимого усилия зажима для обеспечения высоких режимов резания.

Для поиска новых конструкций и схем ВСЗП целесообразно применять системные методы поискового конструирования новых технических решений, среди которых эффективным методом, дающим большое число неожиданных решений, является метод морфологического анализа и синтеза (МА) с построением морфологической матрицы [11-13].

Для построения морфологической таблицы (табл. 1) выбраны следующие основные признаки:

1. Объект зажима.

2. Тип привода зажима.

3. Силовой контур патрона.

4, 5, 6. Структура патрона (корпус, зажимной элемент, передаточно-усилительное звено).

7, 8, 9. Связи корпуса и зажимного элемента.

10. Способ уравновешивания и уменьшения центробежных сил.

11. Способ снятия напряжений корпуса патрона.

Для записи сочетаний альтернатив морфологическая таблица может быть представлена в цифровом виде:

© Ю.М. Кузнецов, Ф.В. Эль-дахаби. 2004

Таблица 1 – Морфологическая таблица съем высокоскоростных зажимных патронов (ВСЗП)

Объект зажима	Тип привода зажима	Силовой контур патрона	Структура(элементы) патрона			Связи (отношение)			Способ уравновешивания центробежных сил	Способ снятия напряжений корпуса патрона
			Корпус патрона	Зажимной элемент	Передаточно-усилительное звено	Корпус зажимные элементы	Зажимной элемент-противовес	Корпус-шпиндель		
1.1. пруток	2.1. гидравлический	3.1. замкнутый открытый	4.1. цельный	5.1. кулачок	6.1. рычажное	7.1. радиальное скольжение	8.1. рычаг вдоль	9.1. по конусу	10.1.гравитационное поле в виде контргруза	11.1. использование легких материалов
1.2. штучная заготовка	2.2. пневматический	3.2. замкнутый закрытый	4.2. сборный (составной)	5.2. цанга	6.2. клиновое	7.2. осевое скольжение	8.2. рычаг поперек	9.2. по резьбе	10.2. гравитационное поле в виде контргруза	11.2. уменьшение массы
1.3. труба тонкостен-ная	2.3. электрический	3.3. разомкнутый		5.3. клин	6.3. мембранное	7.3. наклонное скольжение	8.3. зубчатая передача вдоль	9.3. по торцу	10.3. гравитационное поле в виде элемента патрона	11.3. противодавление
1.4. труба толстостенная	2.4. механический			5.4. пружина	6.4. упругое	7.4. радиальное качение	8.4. зубчатая передача поперёк	9.4.по конусу и торцу	10.4. электромагнитное поле	11.4. магнитное поле
1.5. пруток и штучная заготовка	2.5. инерционный			5.5. эксцентрик	6.5. комбинированное	7.5. осевое качение	8.5. фрикционная связь	9.5. по резьбе и торцу	10.5.электро статитческое поле	11.5. отсутствует
1.6.цилиндический режущий инструмент	2.6. пружинный			5.6. кулачок и сменный элемент	6.6. нет	7.6. наклонное качение	8.6. клин		10.6. силы упругости	
	2.7.вибрационный			5.7. кольцо		7.7. нет			10.7.противодавление	
	2.8. комбинированый									

$$M_1 = \begin{vmatrix} 1.1 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 & 10.1 & 11.1 \\ 1.2 & 2.2 & 3.2 & 4.2 & 5.2 & 6.2 & 7.2 & 8.2 & 9.2 & 10.2 & 11.2 \\ 1.3 & 2.3 & 3.3 & & 5.3 & 6.3 & 7.3 & 8.3 & 9.3 & 10.3 & 11.3 \\ 1.4 & 2.4 & & & 5.4 & 6.4 & 7.4 & 8.4 & 9.4 & 10.4 & 11.4 \\ 1.5 & 2.5 & & & 5.5 & 6.5 & 7.5 & 8.5 & 9.5 & 40.5 & 11.5 \\ 1.6 & 2.6 & & & 5.6 & 6.6 & 7.6 & 8.6 & & 10.6 & \\ & 2.7 & & & 5.7 & & 7.7 & & & 10.7 & \\ & 2.8 & & & & & & & & & \end{vmatrix} \quad (1)$$

Общее число вариантов $N_1 = 6\times8\times3\times2\times7\times6\times7\times6\times5\times7\times5 = 88905600$.

Если рассматривать в качестве объекта зажима только штучную заготовку (альтернатива 1.2), привод зажима (гидравлический- альтернатива 2.1 или механический-альтернатива 2.4), зажимной элемент-кулачок (альтернатива 5.1), связь корпус-шпиндель по конусу (альтернатива 9.1), то матрица (1) упростится:

$$M_2 = \begin{vmatrix} 1.2 & 2.1 & 3.1 & 4.1 & 5.1 & 6.1 & 7.1 & 8.1 & 9.1 & 10.1 & 11.1 \\ & 2.4 & 3.2 & 4.2 & & 6.2 & 7.2 & 8.2 & & 10.2 & 11.2 \\ & & 3.3 & & & 6.3 & 7.3 & 8.3 & & 10.3 & 11.3 \\ & & & & & 6.4 & 7.4 & 8.4 & & 10.4 & 11.4 \\ & & & & & 6.5 & 7.5 & 8.5 & & 40.5 & 11.5 \\ & & & & & 6.6 & 7.6 & 8.6 & & 10.6 & \\ & & & & & & 7.7 & & & 10.7 & \\ & & & & & & & & & & \end{vmatrix} \quad (2)$$

и число возможных решений будет $N_2=1\times2\times3\times2\times1\times6\times7\times6\times1\times7\times5=90720$.

Рассмотрим различные варианты сочетаний из матрицы (2), дающие известные и новые конструкции ВСЗП для зажима штучных заготовок.

Патрон (рис.1) предназначен для базирования и закрепления заготовок деталей типа "диск" и "вал" при их обработке на токарных станках с ЧПУ с высокой частотой вращения шпинделя станка. Центробежные силы, действующие на грузы 1, через рычаги 2 дополнительно поджимают кулачки 3, компенсируя влияние центробежных сил, действующих на кулачки.

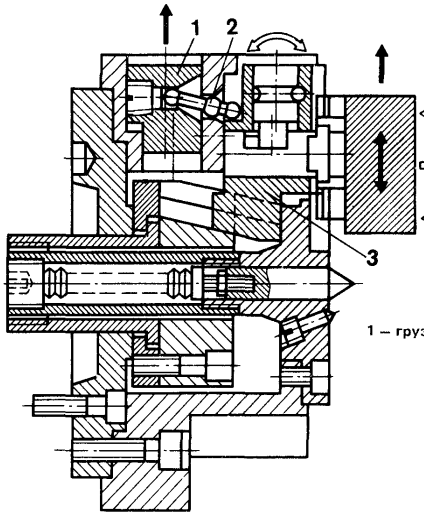


Рисунок 1 – Патрон трехкулачковый клиновой быстропереналаживаемый универсальный с контргрузом по сочетанию 1.2-2.1-3.1-4.1-5.1-6.2-7.1-8.1-9.1-10.1-11.5

Для снижения влияния центробежных сил кулачков на силу зажима заготовки в конструкции рычажного патрона (рис.2) предусмотрена дополнительная масса – груз 1, связанная с рычагом 2, которая частично уравновешивает кулачок 3. Дополнительная масса меньше массы кулачка пропорционально соответствующей силе трения кулачка в направляющих.

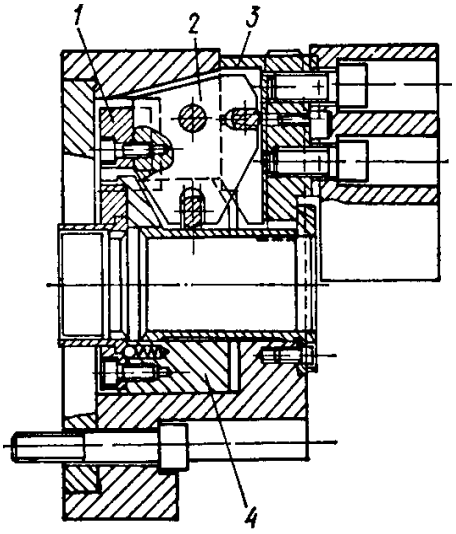


Рисунок 2 – Рычажный патрон по сочетанию 1.2-2.1-3.1-4.1-5.1-6.1-7.1-8.1-9.1-10.1-11.5

В четырехкулачковом самоцентрирующем патроне (рис.3) тяга 3 от привода зажима перемещает кольцо 2 вдоль оси патрона – основное движение. Совместно с кольцом 2 под действием составляющей силы резания P_x, передаваемой винтовыми пазами, перемещаются элементы 8, которые передают движение ползунам 9 с зажимными губками 10. При перемещении губок 10 к поверхности детали боковые силы на кольце 2, возникающие от взаимодействия винтовых пазов 4-7 с элементами 8, взаимно уравновешены.

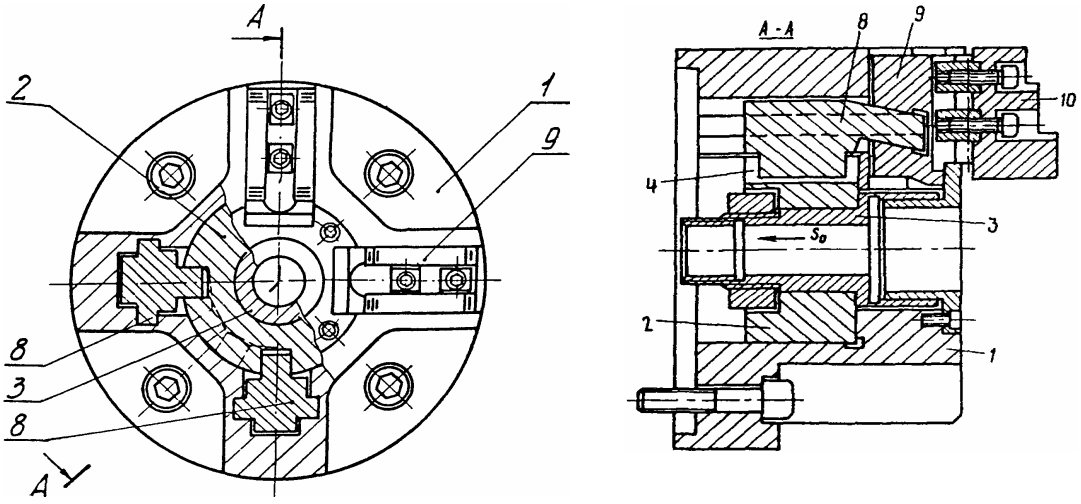


Рисунок 3 – Четырехкулачковый самоцентрирующий патрон по сочетанию 1.2-2.1-3.1-4.1-5.1-6.2-7.1-8.6-9.3-10.6-11.5

Когда поверхности детали касается одна из губок 10, то она смещает деталь к оси патрона. Если поверхности детали касаются две соседние губки, они также смещают деталь к оси патрона. В случае, когда поверхности детали касаются две противолежащие губки перемещение связанных с ними элементов 8 прекращается, а кольцо 2 начинает дополнительно поворачиваться под действием пары сил P_y, которые возникают

от взаимодействия винтовых пазов 4 и 6 с элементами 3 сомкнувшихся противолежащих губок. В результате основного и дополнительного движений кольца 2 другая пара противолежащих губок 10 ускоренно перемещается к детали.

После того, как детали касается третья губка, она начинает смещать деталь к оси патрона до тех пор, пока на поверхности детали не сойдется четвертая губка. Это происходит за счет того, что усилие P_y через кольцо 2 на третьей губке, которая действует на деталь усилием $2P$, вдвое превышает усилие P на сомкнувшихся губках. Усилие $2P$ превышает противодействующие смещению зажимаемой детали силы трения равные $F_{тр} = P f + P f = 2P f$, т.к. коэффициент трения $f < 1$.

После того, как четвертая губка касается детали, дополнительный поворот кольца 2 прекращается и начинается зажим детали от силового привода всеми четырьмя губками 10 [1].

В зажимном патроне (рис. 4) при перемещении тяги 12 влево рычаги с тремя плечами 9 – 11 поворачиваются, увлекая за собой одновременно кулачки 3 и конусную втулку 7, взаимодействующую с кулачками под углом α, определяющим жесткость замкнутого закрытого силового контура. При этом происходит зажим заготовки и замыкание силового контура патрона, что уменьшает влияние центробежной силы на силу зажима заготовки [2].

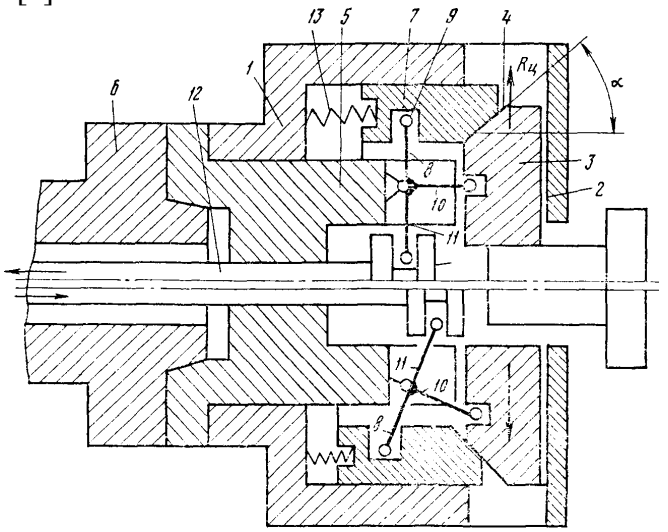


Рисунок 4 – Зажимной патрон по сочетанию 1.2-2.1-3.1-4.1-5.1-6.1-7.1-8.1-9.2-10.1-11.5

В токарном самоцентрирующем патроне (рис. 5) посредством привода через тягу 7 и клиновой механизм 6, взаимодействующий с ползунами 3, закрепленные на них кулачки 5 зажимают обрабатываемую заготовку с заданным усилием. По мере возрастания чисел оборотов увеличиваются центробежные силы, воздействующие на ползуны 3 и закрепленные на них зажимные кулачки 5, в результате чего ослабляется заданное усилие зажима.

При высокоскоростном вращении заготовки усилие зажима может ослабнуть настолько, что под действием сил резания возможно возникновение аварийной ситуации (проворот изделия в кулачках, или даже, вырывание его из патрона). Для предотвращения подобных ситуаций предусмотрено устройство компенсации центробежных сил с противовесами, выполненными в виде дугообразных элементов 9, которые, поворачиваясь на осях 10 под действием центробежных сил на их большие плечи 12, имеющие значительно большую массу, чем меньшие плечи 11, посредством концов последних, входящих в пазы 13, воздействуют на ползуны 3 в направлении геометрической оси патрона. Этим достигается значительная компенсация центробежных сил, воздействующих на зажимные кулачки.

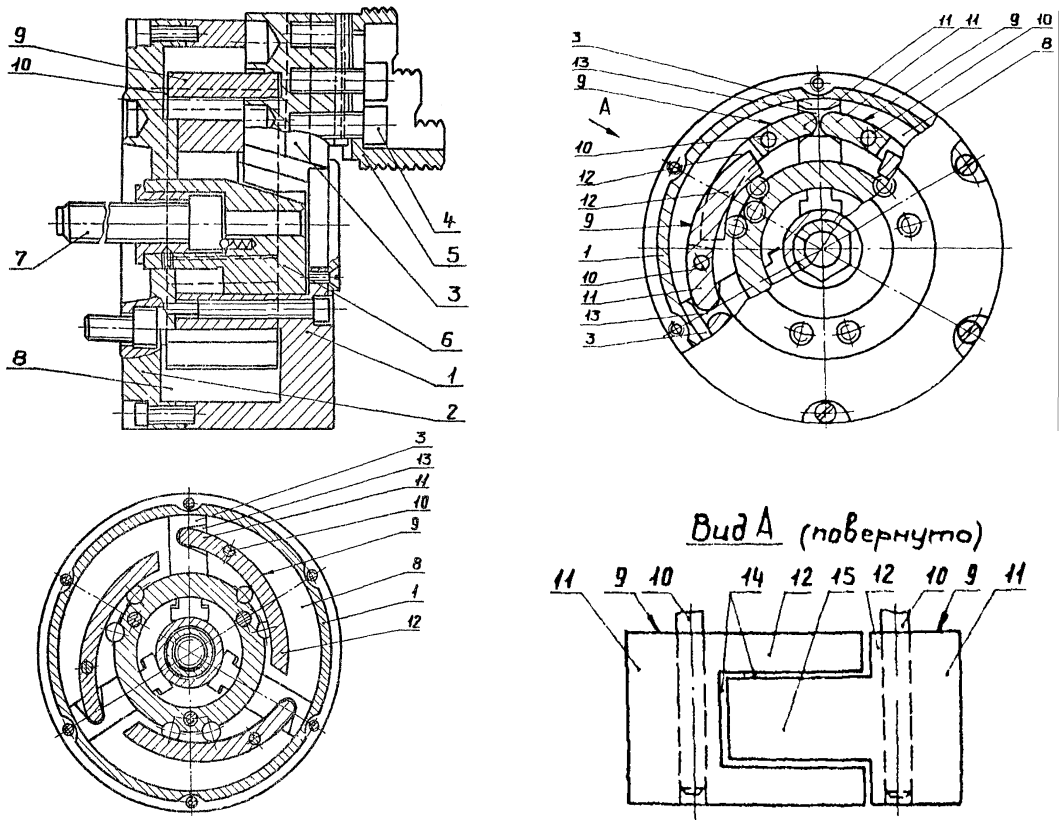


Рисунок 5 – Токарный самоцентрирующий патрон по сочетанию 1.2-2.1-3.1-4.1-5.1-6.2-7.1-8.2-9.1-10.1-11.5

Расположенные по обе стороны каждого ползуна 3 симметрично относительно него дугообразные элементы 9, концы меньших плеч 11 которых входят в общий паз 13 ползуна 3, обеспечивают передачу усилия на ползуны строго по радиус-вектору, направленному к центру патрона. Такое расположение дугообразных элементов исключает перекосы ползунов в направляющих пазах корпуса, а также повышает компенсирующее усилие, воздействующее на зажимные кулачки. При попарном сопряжении дугообразных элементов с ползуном в силу наличия на больших соседних плечах 12 соответственно вилкообразной прорези 14 и ступенчатого участка 15 обнаженная часть последнего свободно проходит сквозь прорезь последнего. Это позволяет полностью использовать объем кольцевой полости 8, а равенство масс плеч с прорезью и ступенчатым участком гарантирует равномерность воздействия дугообразных элементов на ползуны, чем достигается одинаковое воздействие усилия как на каждый отдельно взятый зажимной кулачок, так и на зажимаемую заготовку [3].

Известен многокулачковый самоцентрирующий центробежный патрон (рис. 6), котором приводной механизм, воздействуя на рычаг 26, удерживает центральную втулку 19 в поднятом состоянии (пружина 24 сжата). При этом пружины 15 разводят рычаги 8, обеспечивая постоянный контакт между торовой поверхностью 22 втулки и клиновыми поверхностями 25 рычагов. Кулачки 13 на рычагах 8 также оказываются разведенными, и в патрон устанавливают пруток 14. Приводной механизм отключают и под действием пружины 24 втулка 19 переместится вниз, действуя торцевой поверхностью 22 на клиновые поверхности 25 рычагов, поворачивая их, пока кулачки 13 рабочими кромками предварительно не зажмут пруток. После включения вращения шпинделя 4 с патроном под действием центробежной силы рычаги 8 (в верхней части) стремятся раздвинуться, т.к. масса верхнего (большего) плеча двухплечего рычага 8 значительно больше его нижнего плеча, где установлены кулачки 13. При этом нижние плечи рыча-

гов (короткие) с кулачками 13 будут стремиться сблизиться. Таким образом, на деталь действует зажимное усилие от пружины 24 и центробежной силы рычагов 8, с учетом соотношения их плеч. Втулка 19 постоянно поджимает рычаги, контактируя с ними по поверхности 25, препятствуя их отжиму от зажатого прутка[4].

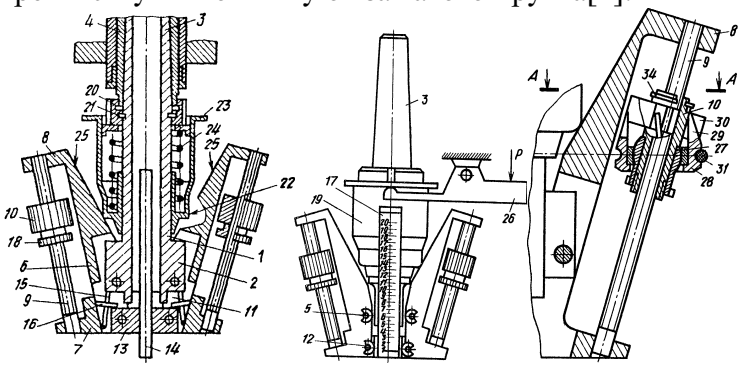


Рисунок 6 – Многокулачковый самоцентрирующий центробежный патрон по сочетанию 1.1-2.8-3.1-4.2-5.1-6.5-7.6-8.1-9.2-10.1-11.5

В зажимном самоцентрирующем патроне (рис.7) крутящий момент передается от привода на центральное колесо 8, далее через сателлиты 9 на водило 7 и через паразитные шестерни 5 на спиральный диск 3 перемещает кулачки 2, которые сходятся, перемещает кулачки 2, которые сходятся и зажимают деталь. При вращении на высоких частотах кулачки 2 стремятся под действием центробежных сил переместиться к периферии, и, следовательно, повернуть диск 3, однако диск повернуться не может, так как связан с планетарным механизмом [5].

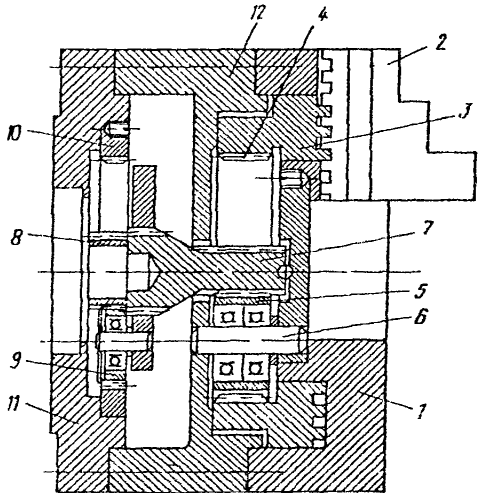


Рисунок 7 – Зажимной самоцентрирующий патрон по сочетанию 1.2-2.3-3.1-4.2-5.1-6.2-7.1--8.4-9.3-10.1-11.5

В клиновом зажимном патроне (рис.8) рабочие кулачки 8 устанавливаются и закрепляются на ползунах 2. Зажим заготовки производится за счет перемещения влево центральной клиновой тяги 3 (при закреплении по наружному диаметру) и вправо (при закреплении по внутреннему диаметру) гидравлическим приводом зажима (не показан). Путем перемещения рейки 9 по рычагам 5 производят настройку патрона на необходимую радиальную силу зажима. Разжим заготовки производится при перемещении центральной клиновой тяги в направлении, обратном зажиму. При необходимости рейку 9 можно вывести из зацепления с зубчатым колесом и таким образом исключить влияние центробежных грузов на радиальную силу зажима, что повышает точность обработки, так как минимизирует деформацию заготовки [6].

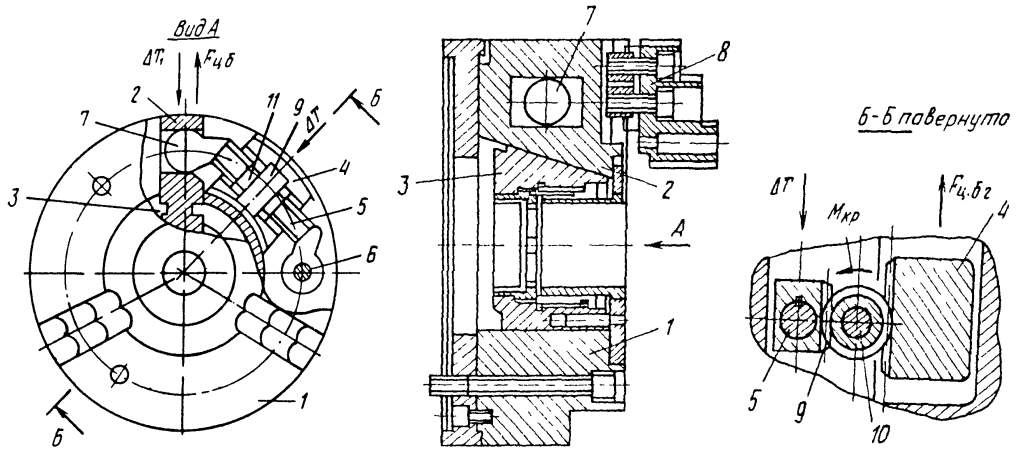


Рисунок 8 – Клиновой зажимной патрон по сочетанию
1.5-2.1-3.1-4.2-5.1-6.2-7.1-8.3-9.3-10.1-11.5

В патроне со спиральным (клиновым) передаточно-усилительным звеном (рис. 9) вращение от привода через соединительный вал - шток 5 передается спиральному диску 2, который радиально перемещает кулачки 3 и противовесы 4, при этом величина и направление перемещения кулачков 3 и противовесов 4 одинаковы, и сохраняются постоянными относительно положения их центров тяжести.

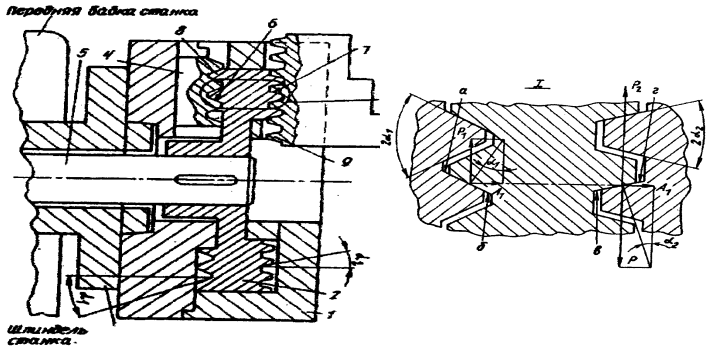


Рисунок 9 – Патрон по сочетанию 1.2-2.3-3.1-4.2-5.1-6.2-7.1-8.6-9.4-10.1-11.5

При вращении патрона возникают центробежные силы P_1, величина которых зависит от частоты вращения шпинделя станка, положения и массы противовесов 4. При этом боковые поверхности «*и*» профиля нарезки противовесов 4, действуя на контактирующие с ними поверхности «*б*» спирального диска 2, создают горизонтальную силу A_1, действующую на спиральный диск 2. Под действием горизонтальной силы A_1 спиральный диск 2 стремится переместиться в осевом направлении, и боковые поверхности «*в*» профиля нарезки спирального диска 2, действуя на контактирующие с ними поверхности 1 кулачков 3, создают силу P, направленную в противоположную сторону центробежной силы P_2, действующей на кулачки, компенсируя ее действие на силу зажима [8].

В невращающемся самоцентрирующем зажимном патроне (рис.10) [8] ползун 4 находится в крайнем правом положении, а грузы 14 сведены к центру. Поверхности 16 не касаются кулачков 5. Обрабатываемая заготовка 21 помещается в пространство между губками 3. Включается гидропривод механизма зажима (не показан). Ползун 4 перемещается влево. Вместе с ползуном перемещается спиральный диск 6, внутренние кулачки 5 и грузы 16. Наружные зажимные кулачки 2, сопряженные с внутренними кулачками 5 посредством клинового соединения при этом перемещаются радиально в направлении к центру и зажимают заготовку 21.

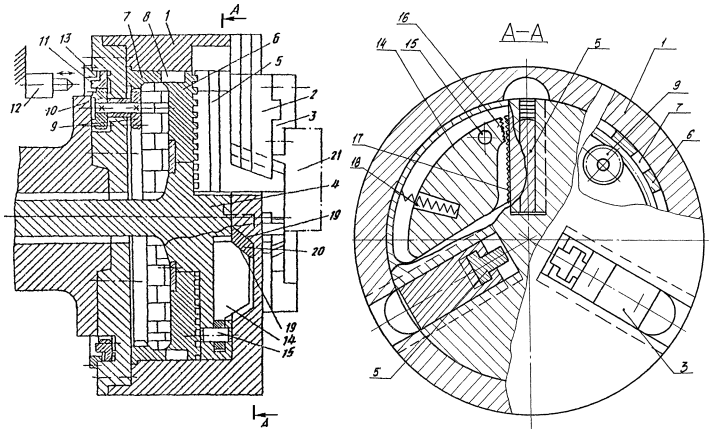


Рисунок 10 – Автоматический самоцентрирующий зажимной патрон по сочетанию 1.2-2.1-3.1-4.2-5.1-6.5-7.1-8.4-9.4-10.1-11.5

При включении вращения патрона с рабочей скоростью грузы 14, расходясь под действием центробежных сил, сжимают пружины 18 и поворачиваются вокруг осей 15. При этом поверхности 16, выполненные по архимедовой спирали, прижимаются к боковым поверхностям внутренних кулачков 8, зажимая их в радиальных направляющих. Если поверхности 16 и кулачки 5 снабжены зубьями, то при этом кроме зажима кулачков 5 в направляющих к ним еще прикладывается усилие, направленное к центру патрона, противоположно направлению центробежной силы. развиваемой самими кулачками 2, 5 и 3. Таким образом в процессе обработки компенсируется вредное влияние центробежных сил на надежность зажима заготовки 21. После окончания обработки патрон останавливается, и под действием пружин грузы 14 сходятся к центру, освобождая кулачки 5. Разжим заготовки осуществляется при перемещении ползуна 4 вправо. При переналадке кулачков на другой диаметр закрепления патрон не вращается. Фиксатор 12 перемещается вправо и взаимодействует с зубчатым венцом 11. При этом посредством системы управления включается медленное вращение патрона. Чтобы при этом вращении грузы 14 не повернулись и не зажали кулачки 5, скосы 19 грузов 14 упираются в накладку скосов 19, потому что ползун 4 находится при этом в крайнем правом положении.

В патроне типа KTGF фирмы “Paul Forkardt GmbH & Co. KG”, Германия (рис.11) используется компенсаторы центробежной силы в виде уравновешивающих грузов противовесов 2. Движение от привода зажима передается через связанную с тягой втулку, которая с помощью специальных Т-образных наклонных пазов в обойме 7 перемещает основные кулачки 4 вместе со сменными кулачками 6, прижатыми болтами 5 к рифленой поверхности на стыке кулачков 4. При движении кулачка 4 в радиальном направлении поверхности поворачивается специальный штифт 3, двигающий противовес 2 при изменении диаметра базовой поверхности заготовки. При больших частотах вращения центробежные силы действуют одновременно на противовесы 2 и комплекты кулачков 4 и 6, сохраняя установленную силу зажима.

В патроне (рис.12) клиновая муфта 2 контактирует одновременно с основным кулачком 5 и противовесом 3. Когда кулачки зажимают заготовку по наружной поверхности зажимное усилие передается от клиновой муфты через противовес рычагу 4, а от него кулачку 6. При зажиме по внутренней цилиндрической поверхности направление и усилие от клиновой муфты 2 передается непосредственно на кулачок. Масса противовеса определяется из условия, что действующая на него центробежная сила приблизительно равна центробежной силе комплекта основной кулачок 5-сменный кулачок 6 при наибольшем отдалении последнего от оси патрона. В этом случае с помощью рычага 4 центробежные силы уравновешивают силы зажима.

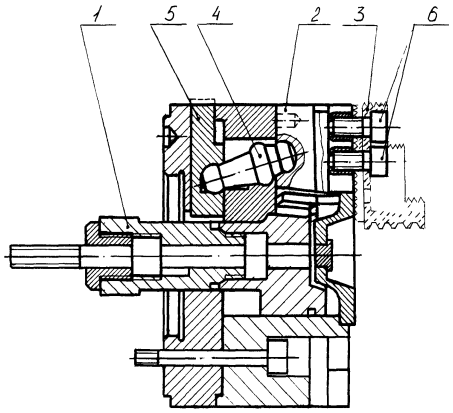


Рисунок 11 – Патрон типа KTGF по сочетанию 1.2-2.1-3.1-4.2-5.1-6.2-7.1-8.1-9.3-10.1-11.5

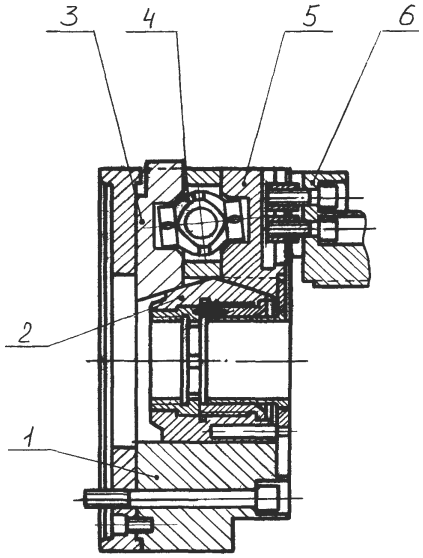


Рисунок 12 – Патрон с компенсатором центробежных сил по сочетанию 1.5-2.1-3.1-4.3-5.6-6.2-7.1-8.6-9.3-10.1-11.5

Предложенная морфологическая матрица может быть расширена за счет новых альтернатив признаков, но даже в представленном виде содержит много новых решений.

Например, в соответствии с морфологической матрицей (табл.1) предложена новая конструкции ВСЗП, выполненного в виде зажимного патрона с компенсацией центробежных сил (рис.13) с помощью контргруза.

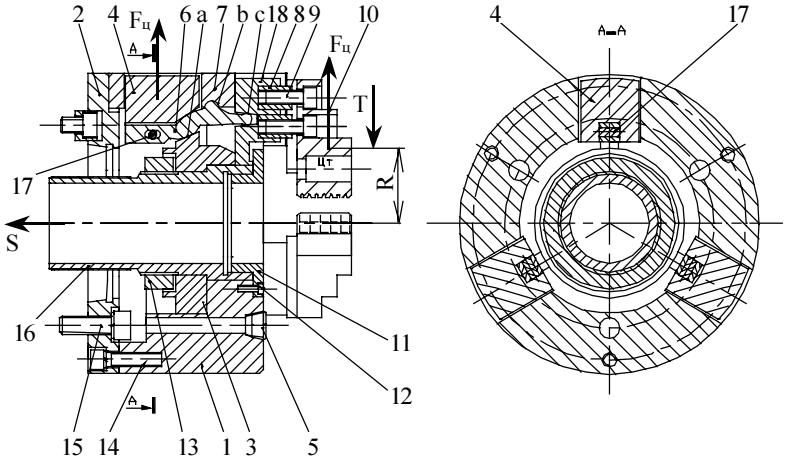


Рисунок 13 – Зажимной патрон с компенсацией центробежных сил по сочетанию 1.5-2.1-3.1-4.1-5.6-6.5-7.1-8.1-9.4-10.1-11.5

От гидропривода зажима тяга 16 перемещается влево и через клин 3 поворотный рычаг 6 на оси 17 относительно опоры *«b»*, в результате чего внутренний кулачок 18 вместе с зажимным кулачком 10, жестко связанным с деталью 9 начинает зажим заготовки. Одновременно с этим клин 3 при помощи скоса «*a*» дополнительно перемещается влево, зажимая через кулачок заготовку. При включении вращения патрона при высоких частотах вращения центробежная сила, действуя на кулачок 10, компенсируется центробежной силой груза 4, поворачивающего рычаг 6 относительно опоры «*b*», что обеспечивает надежный зажим заготовки в процессе работы.

Выводы

1. Предложенный системно-морфологический подход и разработанная морфологическая таблица с основными признаками и альтернативами их реализации, позволяющая синтезировать новые схемы высокоскоростных зажимных патронов (ВСЗП) на уровне изобретений.

2. Разработана конструктивная схема ВСЗП с компенсацией центробежных сил неуравновешенных зажимных кулачков, которая является объектом теоретических и экспериментальных исследований.

3. Необходимо вести поиск новых технических решений ВСЗП, позволяющихвести высокоскоростную обработку деталей типа тел вращения на токарных и шлифовальных станках с различными системами управления.

Список литературы:

1. А.с.СССР № 1743711 Четырехкулачковый самоцентрирующий патрон. /В.И. Суменко, Н.А., Кикнадзе, Т.Ш. Таниашвили. В 23 В 31/00. Бюл. №24, 1992.
2. А.с.СССР № 878227 Зажимной патрон. / Кузнецов Ю. Н. В 23 В 31/20. Бюл. №41, 1981.
3. А.с.СССР № 1745423 Токарный самоцентрирующий патрон. / Е.К.Готовчиц, Л.В. Беляцкий, В.А., Балькин. В 23 В 31/14. Бюл. №25, 1992.
4. А.с.СССР № 1808490. Многокулачковый самоцентрирующий центробежный патрон. / А.А. Галеев. В 23 В 31/14. Бюл. №14, 1983.
5. А.с.СССР №1741975. Зажимной самоцентрирующий патрон./ О.В. Кочнев, А.М. Свинцов, А.В., Чистяков. В 23 В 31/00. Бюл. №23, 1992.
6. А.с.СССР № 1673300. Клиновой Зажимной патрон. /Ю.Н.Кузнецов, В.Н. Ахрамович, И.В., Лапчевский. В 23 В 31/177. Бюл. №32, 1991.
7. А.с.СССР № 904905. Центробежный патрон. /В.А. Карпушин, В.Е. Маджуго, В.М. Гаврилов, Н.Н. Дорожкин. В 23 В 31/14. Бюл. №6, 1982.
8. А.с.СССР № 1722705. Автоматический самоцентрирующий зажимной патрон. / Р.Н. Фридман, А.Н. Артоболевский. В 23 В 31/169. Бюл. №12, 1992.
9. Кузнєцов Ю.М. Теорія розв'язання творчих задач. -К.:ТОВ,,ЗМОК" –ПП „ГНОЗИС", 2003. –294 с.
10. Одрин В.М., Картавов С.С. Морфологический анализ систем. Построение морфологических матриц. - К.: Наукова думка,1977.-183 с.
11. Самонастраивающиеся зажимные механизмы: Справочник, Ю.Н.Кузнецов, А.А. Вачев, С.П. Сяров, А.И. Цървенков; Под ред. Ю.Н. Кузнецова.-К.: Техника, 1988.- 222 с.

УДК 621.94

П.П. Мельничук, Я.А. Степчин
Житомирський державний технічний університет

Керування стійкістю токарних твердосплавних різців в умовах віброактивності технологічної обробної системи

Наведені результати експериментальних досліджень впливу на стійкість токарних твердосплавних різців основних параметрів віброактивності процесу різання – потужності віброакустичного сигналу та її розподілення по діапазонах частот. Представлено комплексний метод визначення оптимльних, за рівнем вібрацій, режимів різання.
стійкість, віброактивність, віброакустичний сигнал, режими різання

У кожний різальний інструмент, з початку його проектування, закладається певний ресурс використання, що характеризується параметрами стійкості, безвідмовності та довговічності. В залежності від якості виготовлення, правильної експлуатації, вибору оптимальної геометрії, для визначених умов обробки, оброблюваного матеріала, характеристик обладнання (верстата, пристосувань і т. ін.) та призначених режимів різання, цей ресурс може бути збільшений (або зменшений) в деяких випадках у десятки разів [1, 2, 4, 5, 8].

Існуючі методи визначення обробляємості металів та сплавів та визначення стійкісних залежностей $V = f(T)$, $V = f(T, t, s)$ базуються на тривалих та вартісних експериментальних дослідженнях закономірностей спрацювання інструмента [3, 4, 9, 11] і встановлюють залежність складових функції стійкості (V, t, s) у вузькому діапазоні "оптимальності" одного з вибраних параметрів для чітко визначеної пари: оброблюваний і інструментальний матеріал. Відповідно, статистично визначена стійкість реального інструмента при обробці заданого матеріалу може змінюватись в широких межах в залежності від коливання параметрів інструментального і оброблюваного матеріалу [10], умов обробки (параметрів обробної системи.

Значний вплив на стійкість токарних різців, поряд з режимами різання, геометрією різальної частини та матеріалом інструмента і оброблюваної деталі має рівень віброактивності обробки, який практично не враховується у відповідних нормативах [9, 11].

Питання впливу вібрацій на стійкість інструмента та якість обробки розглядалися у роботах [1, 2, 5, 7, 13]. Дослідження проблеми виконувалися різними напрямками:

1. Визначенням доцільності використання коливань при різанні для полегшення умов стружкоутворення та стружкодроблення, пластичної деформації в зоні різання, зменшення наростоутворення. Пропонувалося примусове введення коливань у зону різання (зазвичай, при обробці важкооброблюваних сталей та сплавів) [1, 2, 7, 13].

2. Визначенням оптимального рівня автоколивань при різанні, який забезпечує максимальну стійкість інструмента та (або) необхідну якість обробки, та підтримка цього рівня збільшенням жорсткості елементів ТОС або введеням додаткових демфуючих пристроїв.

При постійній зміні умов обробки (для точіння) – зміни розмірів та жорсткості заготовки, вильоту та геометрії різця і відповідно – характеристик коливальних

© П.П. Мельничук, Я.А. Степчин. 2004

процесів,– важливе значення має загальний рівень потужності коливальних процесів та їх розподілення по частотам, а не середнє значення амплітуди автоколивань [2, 13].

З метою визначення впливу рівня і характеристик віброакустики ТОС на стійкість токарних твердосплавних різців було виконано багатофакторний експеримент.

У експериментальному дослідженні використовувалася установка [6], за допомогою якої визначалися рівні спектральної потужності вібраційних прцесів при різанні та їх контроль з часом обробки. Режими різання вибиралися за рекомендаціями [9, 11] для чистової токарної обробки конструкційних сталей твердосплавним інструментом і витримувалися постійними для кожної групи дослідів.

При обробці використовувалися токарні різці з механічним кріпленням твердосплавних пластин, основні параметри наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Геометричні параметри різальної частини

Найменування різця	Марка матеріала пластини	Геометричні параметри різця, град.				
		φ	φ_1	α	γ	λ
Тип 3, ГОСТ 21151-75	Т15К6	60	15	8	8	8
Тип 4, ГОСТ 21151-75	Т15К6	93	7	8	8	10

Оброблювана заготовка (матеріал – Сталь 40) встановлювалася на верстаті КА-280 в затискний самоцентруючий патрон з додатковою підтримкою заднім центром. Рівень потужності коливальних процесів вимірювався в діапазоні частот від 0 до 5000 Гц, який був розділений на два піддіапазони, умовно “низькочастотних” коливань (1 піддіапазон – 0…1500 Гц), який включає в себе всі перші власні частоти коливань системи заготовки та системи інструмента (супорта) і низькочастотні автоколивання процеса різання та “високочастотних” (2 піддіапазон – 1500…5000 Гц), який включає перші власні частоти згинаючих коливань різця та високочастотні автоколивання процеса різання. Межею піддіапазонів прийнято мінімум спектральної потужності сигналу, присутній на 90% спектрограм. За критерій спрацювання різця приймалася ширина фаски спрацювання по задній поверхні різальної пластини величиною h = 0,5 мм (відповідно до рекомендацій [12]). Вимірювання фаски спрацювання виконувалося на мікротвердомірі ПМТ-3.

Зважаючи на можливу нелінійність залежності стійкості від потужності вібраційних процесів, досліджувані фактори підтримувалися на трьох рівнях: -1, 0 та +1.

Було виконано чотири групи по 9 дослідів, кожний з яких повторювався два рази.

В кожній групі змінювався один з параметрів – головний кут в плані та швидкість різання (яка варіювалася в межах близьких до рекомендованих) – таблиця 2. Інші параметри залишалися незмінними: t = 0,5 мм, S = 0,05 мм/об.

З отриманих результатів досліджень випливає, що незалежно від зміни швидкості різання та кута в плані токарних різців збільшення вібропотужності процесу різання негативно впливає на стійкість різця (рис. 1). При зростанні потужності вібрацій від мінімального до середнього рівня вплив на стійкість у 2 – 4 рази менший ніж при збільшенні від середнього до високого.

На основі аналізу проведених експериментальних досліджень, результатів досліджень інших авторів [3, 4, 5] та динамічних моделей процесу різання і ТОС [6] з часом спрацювання різця була побудована залежність (рис. 2) зміни швидкості різання

та подачі, яка відповідає мінімальній інтенсивності вібрацій процесу обробки з часом спрацювання різця.

Таблиця 2 – Матриця планування та результати дослідів

№ п/п	Вхідні параметри				Вихідний параметр – стійкість різця. Групи дослідів:			
	Діапазони частот				№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
	0 – 1500 Гц		1500 – 5000 Гц		V = 180 м/хв		V = 220 м/хв	
	P_1	x_1	P_2	x_2	φ = 93°°	φ = 45°°	φ = 93°°	φ = 45°°
1	0 – 5 Дб	-1	0 – 5 Дб	-1	83 87	40 42	64 66	35 37
2	10 – 15 Дб	+1	0 – 5 Дб	-1	61 64	23 25	45 47	21 23
3	0 – 5 Дб	-1	10 – 15 Дб	+1	69 71	25 27	51 54	23 25
4	10 – 15 Дб	+1	10 – 15 Дб	+1	30 30	15 16	27 29	18 18
5	5 – 10 Дб	0	5 – 10 Дб	0	74 78	31 33	54 58	29 31
6	10 – 15 Дб	+1	5 – 10 Дб	0	47 49	21 23	34 37	22 24
7	0 – 5 Дб	-1	5 – 10 Дб	0	84 87	39 42	64 66	35 37
8	5 – 10 Дб	0	10 – 15 Дб	+1	41 43	19 21	31 33	22 22
9	5 – 10 Дб	0	0 – 5 Дб	-1	80 84	39 42	63 65	34 37
Розрахункові значення стійкості за даними				[117]	100	30	60	20
				[95]	~ 1000	260	460	95

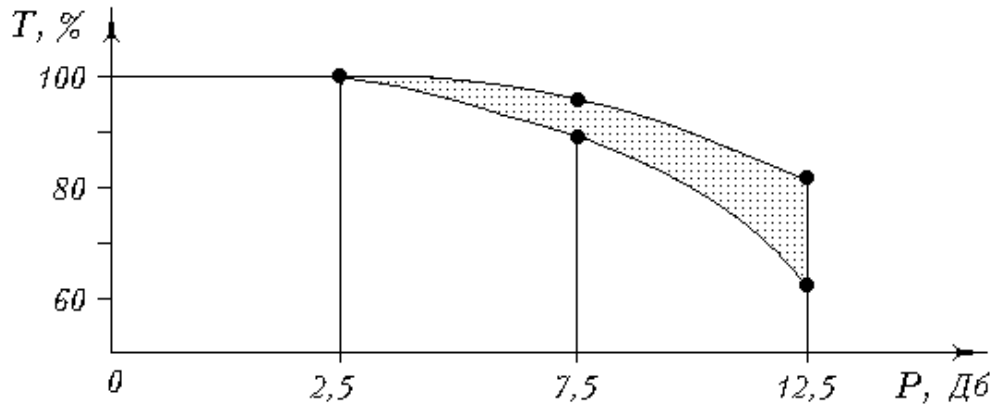


Рисунок 1 – Залежність стійкості токарних твердосплавних різців від рівня вібраційної потужності ТОС

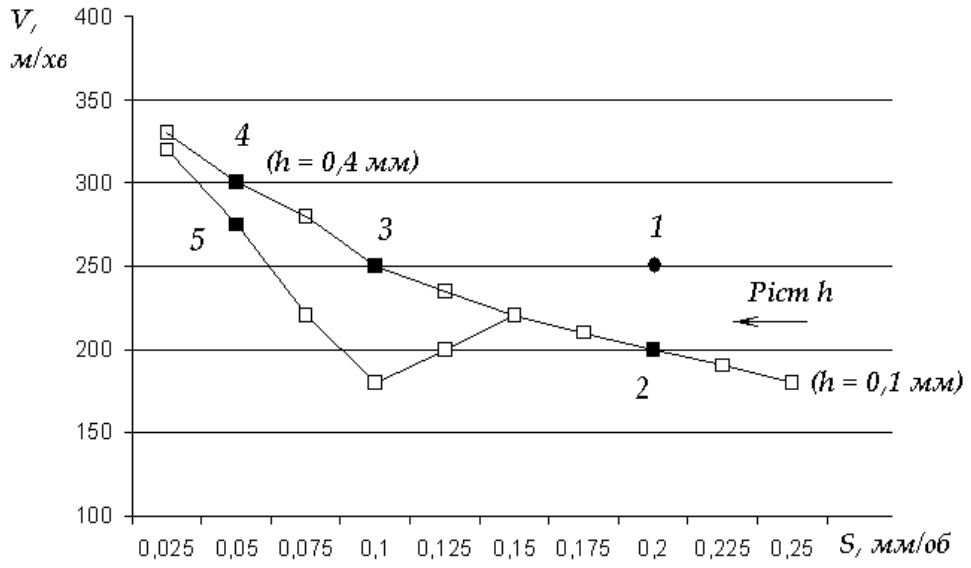


Рисунок 2 – Залежність співвідношення швидкості різання та подачі від величини фаски спрацювання по задній поверхні, що відповідає мінімуму інтенсивності коливань в зоні різання

З збільшенням фаски спрацювання по задній поверхні відбувається зниження оптимальної подачі та ріст оптимальної швидкості різання, що відповідають мінімуму інтенсивності вібрацій (за експериментальними даними, вплив глибини різання за умов гарантованої усталеності ТОС на інтенсивність вібрацій практично відсутній, мінімум відповідає t = 0,3…0,5 мм).

Виконаємо перевірку економічної ефективності використання представленого метода керування стійкістю. Для чистового точіння застосуємо критерії оптимальності обробки [5]:

- по максимальній довжині різання $L = VT$;
- за максимальною площею обробленої поверхні $П = VTS/1000$.

Додатково слід враховувати стабільність усіх інших вхідних параметрів для варіантів, що порівнюються – геометрію інструмента, параметри матеріалу деталі, якісні характеристики обробленої поверхні та величину економічно„оптимальної" стійкості інструмента, яка в залежності від його вартості та інших умов обробки може становити від 25 до 300 хв.

Скориставшись графіком (рис. 2) виконаємо розрахунок та експериментальну перевірку стійкості різців та продуктивності обробки за різних режимних умов (табл. 3). Інші параметри обробки прийняті однаковими: $\gamma = 10^{\circ}$, $\alpha = 8^{\circ}$, $\varphi = 93^{\circ}$, величина розмірного спрацювання по задній поверхні h = 0,5 мм, шорсткість обробленої поверхні вище *Ra 3,2*.

Послідовності зміни складових режиму різання (наприклад, 1 − 3 − 4) передбачають обробку при фіксованих значеннях S, V, коли при зростанні фаски спрацювання підтримується мінімум вібрацій, далі перехід до наступної пари S, V.

Вага критеріїв оцінки ефективності обробки неоднакова– при близьких значеннях стійкості критерій обробки максимальної площі поверхні деталі є більш вагомим відносно довжини шляху різання. Відповідно, серед запропонованих моделей зміни параметрів S, V оптимальним є варіант 1 – 3 – 4, але і два інших варіанта по другому критерію ефективності переважають варіанти з S, V постійними на протязі всього часу бробки.

Таблиця 3 – Результати перевірки стійкості та продуктивності різців

Параметри режиму різання: *S*,*V* (точки рис. 2.)	Розрахункова стійкість (хв.)		Експери-ментальна стійкість (хв.)	*L = VT*		*П = VST/1000*	
	[11]	[9]		м	рівень	$м^2$	рівень
1	52	70	56	14000	7	2,80	3
3	95	110	95	23750	5	2,375	5
4	75	92	83	24900	3	1,245	7
5	125	140	115	31625**	1	1,581	6
1 - 3 - 4*	-		96	25105	2	3,24**	1
2 - 3 - 4	-		110	24500	4	3,05	2
2 - 3 - 5	-		102	22250	6	2,775	4

* Представлена послідовність зміни режимних параметрів відповідає найбільш ефективній обробці по співвідношенню обох критеріїв.

** Максимальне значення критерію ефективності.

Порівнюючи варіант 1 − 3 − 4 з найкращим варіантом (1) *S*, *V* − const, отримуємо ріст ефективності обробки по 1 критерію на 79 %, по другому критерію на 16%, для варіанта 2 − 3 -− 4 − 75% та 9 % відповідно.

Таким чином, цілеспрямовано змінюючи в процесі обробки різанням співвідношення швидкість різання - подача є можливість керувати стійкістю інструмента та підвищувати ефективність обробки.

Висновки:

Представлений метод визначення оптимального співвідношення складових режиму різання з метою зменшення рівня вібрацій та керування стійкістю різців обумовлює основні вимоги до вибору вхідних параметрів:

1. Вплив глибини різання в межах гарантованої усталеності ТОС на інтенсивність вібрацій практично відсутній, місцевий мінімум відповідає t = 0,3…0,5 мм.

2. З збільшенням фаски спрацювання по задній поверхні токарного різця відбувається зниження оптимальної подачі та ріст оптимальної швидкості різання, що відповідають мінімуму інтенсивності вібрацій.

3. Зменшення потужності коливань у зоні різання у два рази збільшує стійкість різця на 10-70 % в залежності від початкового рівня вібрацій. Відповідно, для кожної ТОС, слід визначати межу прийнятного рівня потужності коливань, яка гарантує незначне зниження стійкості твердосплавних різців.

4. З метою підтримки на протязі усього часу обробки мінімуму вібрацій (та мінімуму інтенсивності спрацювання) рекомендується застосовувати послідовність одночасної зміни величини швидкості різання та подачі в залежності від величини фаски спрацювання по задній поверхні різця (наприклад, під час зміни обробленої деталі).

5. Для ТОС, що розглянута у роботі [6], максимальний рівень спрацювання, що допускає оптимізацію за параметрами *S*, *V* по мінімуму вібрацій – *h* = 0,55 мм.

6. При застосуванні методу підбору пари *S*, *V* першочергове значення має визначення найбільш віброактивного діапазона частот ТОС. При зростанні нижньої частоти цього діапазона зростають абсолютні значення пари *S*, *V*, що допускає використання більш продуктивних режимів обробки.

Список літератури

1. Жарков И.Г., Попов И.К. Влияние автоколебаний станка на стойкость инс-трумента // Станки и инструмент. – 1971. – №5. С. 26-28.
2. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом.– Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
3. Зорев Н.Н. Вопросы механики процеса резания металлов. – М., 1956. – 389 с.
4. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов.– М.: Маши-ностроение, 1966. – 265 с.
5. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
6. Мельничук П.П, Степчин Я.А. Визначення характеристик динамічної системи верстата 16К20 // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 14. – С. 62–67.
7. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов: Учебное пособие для вузов. – М.: “Высшая школа”, 1974. – 587 с.
8. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания .- К . : Наукова думка. – 1990. – 320 с
9. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. (под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова) – : М . Машиностроение , – 1976 . Т.2 . – 469 с .
10. Креймер Г.С. Прочность твердых сплавов. – Металлургия, 1971, - 247 с.
11. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ, Ч2. – М. Экономика. 1990. – 472 с.
12. Потейко А.Д., Тимофеев Ю.В., Мазур Л.Е. Эффективность процессов обработки в массовом производстве. – К.: Техніка,1980. – 160 с.
13. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970, - 351 с.
14. Сердюк А. И. Влияние режимов резания на эффективность работы ГПС / Стин. 1997. - №5. С 5-8.

УДК 621.914.3

В.Б. Струтинський, д-р техн. наук, О.В. Колот, канд. техн. наук
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Застосування методів спектрального аналізу процесів при діагностичних випробуваннях гідравлічних амортизаторів

Розглянуто розроблене стендове устаткування для діагностичних випробувань гідравлічних амортизацій. Складена математична модель і виконано моделювання стендових випробувань амортизацій.
експериментальний стенд, пружно-дисипативні характеристики, амортизатори, діагностика, спектральний аналіз

Розробка надійних методів діагностики гідравлічних амортизаторів транспортних засобів являє собою важливу науково-технічну проблему. Її вирішення потребує проведення широкого кола досліджень. Зокрема, потребує визначення робочий процес амортизатора та встановлення взаємозв'язаного комплексу факторів, які визначають характеристики амортизаторів та їх зміни в процесі експлуатації.

Дослідженню характеристик амортизаторів присвячена велика кількість публікацій [1,2]. Автори розглядають схемні і конструктивні рішення, робочі процеси, методи випробувань амортизаторів, діагностику їх технічного стану.

Діагностика технічного стану амортизатора в кінці міжремонтного періоду потребує спеціального стендового обладнання. Як правило, застосовуються стенди, що задають переміщення штока гідроциліндра амортизатора по синусоїдальному закону. По експериментально одержаній залежності зусилля на штоці визначаються характеристики амортизатора і їх відхилення від номінальних значень [3].

Сучасне стендове обладнання широко використовує засоби обчислювальної техніки для забезпечення процесу випробувань і аналізу одержаних результатів. Тому є можливість збільшити інформативність випробувань і підвищити його якість. Для забезпечення цього необхідно провести спеціальні дослідження.

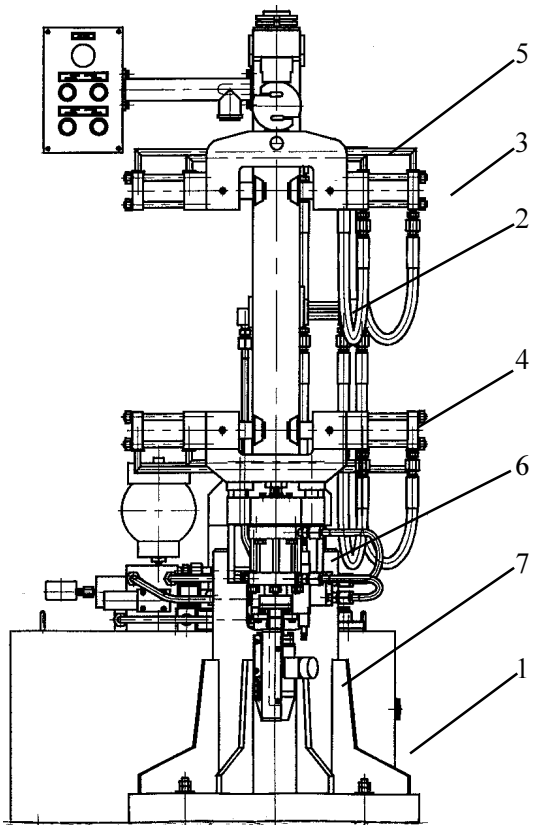
В даній статті наведені результати розробки стендового обладнання та алгоритмічного забезпечення діагностичних випробувань амортизатора, що базуються на методах спектрального аналізу динамічних процесів.

Експериментальний стенд для визначення пружно-дисипативних характеристик амортизаторів змонтовано на силовій основі 1 (рис 1).

Стенд має траверсу 2, на якій розташовані 4 верхні захвати, що приводяться в дію гідроциліндрами 3. Верхні захвати (з гідроциліндрами 4) служать для закріплення амортизатора. Переміщення рухомих вузлів амортизатора здійснюється спеціальним електрогідравлічним приводом, який має гідроциліндр 6. Виміри зусилля, яке сприймає амортизатор, здійснюється пристроєм – вимірювачем зусилля 5, а виміри відносного переміщення рухомих вузлів амортизатора здійснюється пристроєм – вимірювачем переміщення 7.

Траверса може зміщуватись в поперечно-кутовому напрямку на кут 1800, займаючи необхідне зручне для виконання вимірів положення. Від номінального положення траверси вона може відхилятись вправо і вліво на кут 900.

© В.Б. Струтинський, О.В. Колот. 2004



1 - силова основа; 2 - траверса; 3 - гідроциліндр верхнього захвата; 4 - гідроциліндр нижнього захвата; 5 - пристрій – вимірювач зусилля на штоці; 6 - гідроциліндр переміщення; 7 - пристрій – вимірювач переміщення.

Рисунок 1 – Вигляд спереду розробленого експериментального стендового обладнання для визначення характеристик амортизатора

Програма випробувань реалізує закон переміщення штока амортизатора з вимірами реального переміщення штока в функції часу та реєстрації реального зусилля на штоці (рис.2).

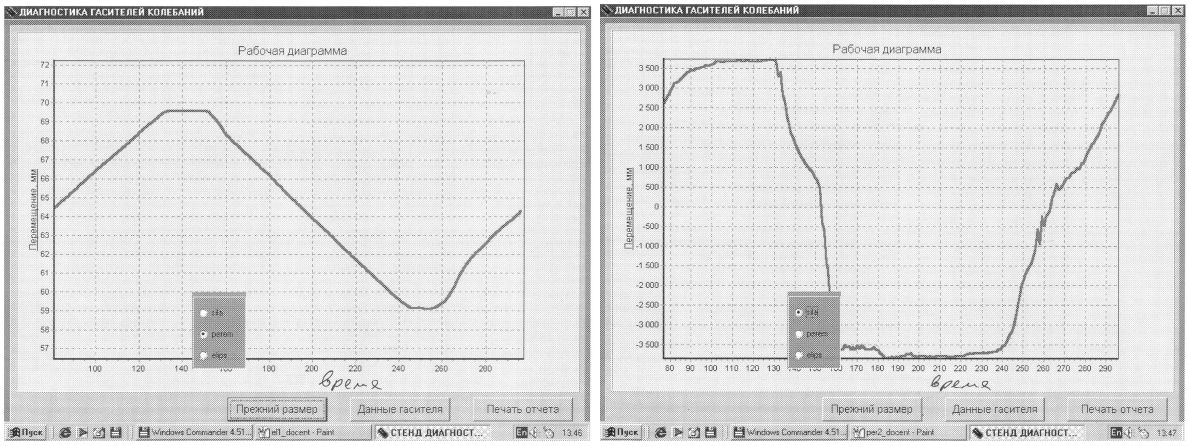


Рисунок 2 – Експериментально визначені переміщення штока та зусилля на штоці одержані при діагностичних випробуваннях амортизатора

Експериментальні дані подаються у вигляді полярної діаграми сила-переміщення, яка об’єднує дві залежності (див. рис. 3).

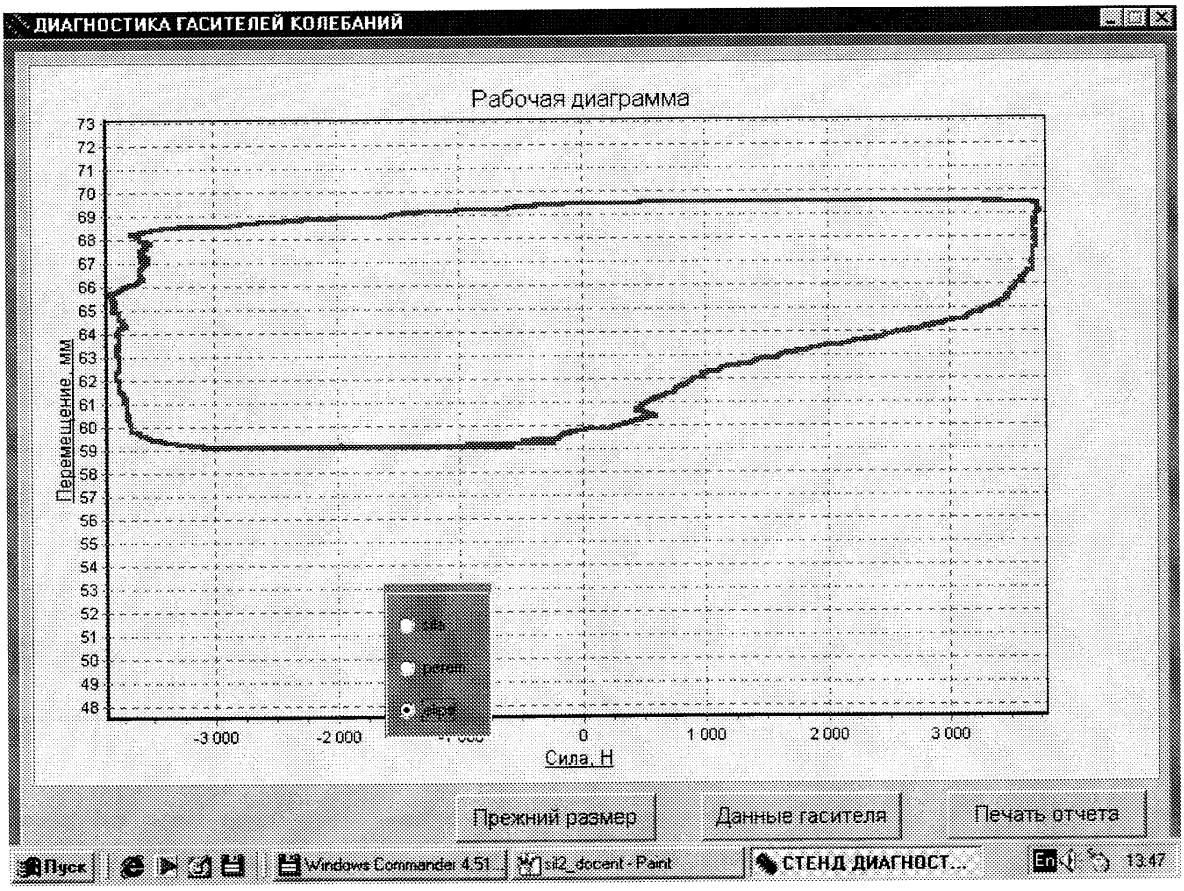


Рисунок 3 – Експериментально визначена діаграма сила-переміщення при стендових випробуваннях амортизатора

Полярна діаграма має вигляд неправильного еліпса із ділянками близькими до горизонтальних і вертикальних ліній.

Складова кожного із параметрів діаграми (сила, переміщення) має основну (першу) гармоніку розкладу. При врахуванні лише основних гармонік параметричне подання полярної діаграми має вигляд:

$$\begin{cases} f_p(x) = \dfrac{a_0}{2} + A_1 \sin\left(\dfrac{2\pi}{T}x + \psi_1\right), \\ f_z(x) = \dfrac{az_0}{2} + Az_1 \sin\left(\dfrac{2\pi}{T}x + \psi z_1\right) \end{cases} \quad (1)$$

де f_p, f_z – відповідно зусилля на штоці та переміщення штока. Коефіцієнти розкладу, визначені раніше і подані в числовому вигляді.

Полярна діаграма, яка відповідає основним (першим) гармонікам розкладу і розрахована згідно залежностей (1) засобами пакету MathCAD, має вигляд правильного еліпса, повернутого відносно осей координат (рис.4).

Дана полярна діаграма дуже наближено відповідає експериментальній. Вона не включає інформацію про ділянки близькі до прямолінійних. Недостатня точність даної діаграми і у визначені діапазонів зміни параметрів.

Більш точним є полярні діаграми, які враховують суттєві гармоніки розкладу. Із збільшенням числа врахованих гармонік форма і розміри діаграми наближаються до експериментально визначеної (рис.5).

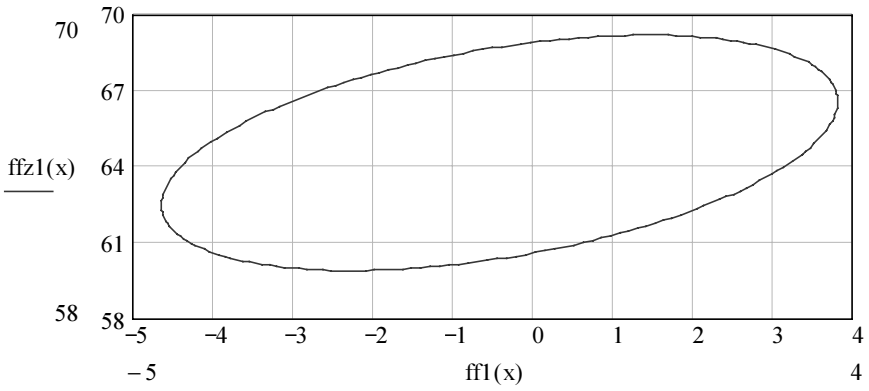
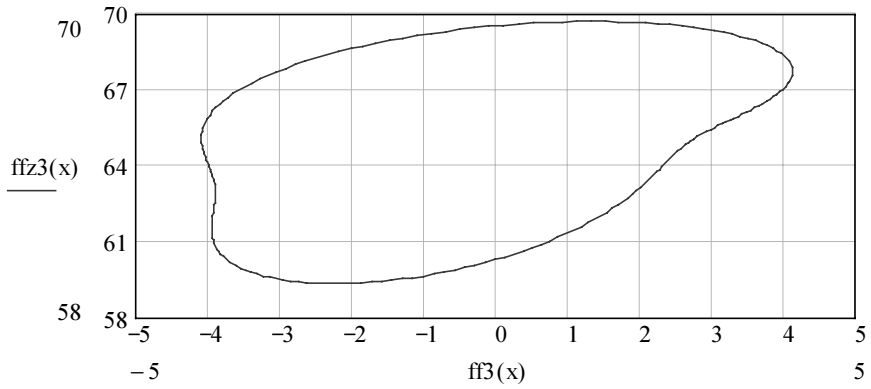
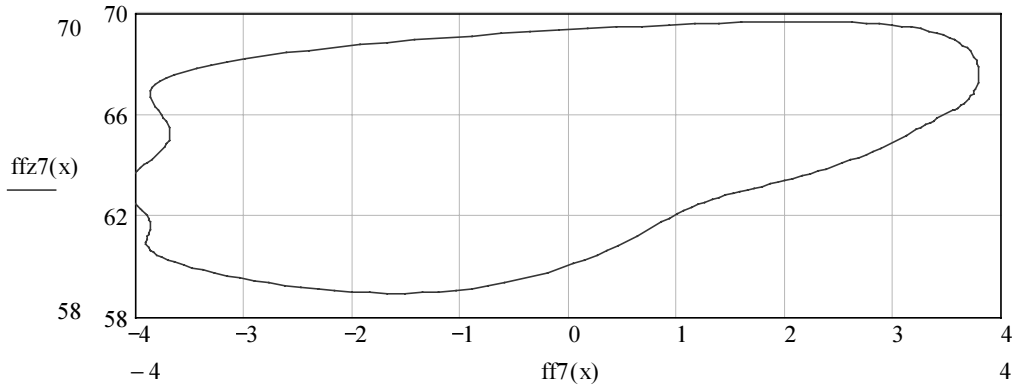


Рисунок 4 – Полярна діаграма “сила-переміщення”, яка враховує лише основні (перші) гармоніки розкладу параметрів у ряд Фур’є



(а)



(б)

Рисунок 5 – Полярні діаграми “сила-переміщення ”, які враховують три суттєві гармоніки розкладу (а) та сім суттєвих гармонік (б)

Із порівняння одержаних діаграм із експериментально визначених (див. рис. 3) випливає, що навіть врахування всіх гармонік, амплітуди яких складають більше 3..5% від основних, не дає можливості точно описати реальний процес.

Для достатньо повного і вичерпного опису процесу необхідно врахування ряду малосуттєвих гармонік з номерами 5..15 і вище. Уже при врахуванні 12-ти гармонік спостерігається кількісна і якісна відповідність розрахунків параметрів відрізками ряду Фур’є і експериментальними даними.

Висновки

1. Розроблене стендове обладнання дозволяє здійснити діагностичні випробування амортизаторів із визначення інтегральних показників їх якості та провести комплексний спектральний аналіз характеристик “сила-переміщення” амортизатора в умовах роботи, близьких до експлуатаційних.

2 Для діагностики характеристик амортизатора найбільш доцільно використати полярну діаграму “сила-переміщення”, визначену експериментально, та розклад її складових (окремо сили і переміщення) в ряди Фур’є. При цьому врахування лише суттєвих складових розкладу є недостатнім для забезпечення необхідної точності опису полярної діаграми. Для достатньо точного опису полярної діаграми необхідно врахувати 10..15 гармонік. Для виявлення особливих ділянок діаграми, зокрема, точок зламу, високочастотних осциляцій та обмежень необхідно врахувати близько 100 гармонік розкладу.

3 Як напрямок подальших досліджень рекомендується провести дослідження в напрямку визначення впливу випадкових змін процесу в межах циклу на спектральні характеристики силових і кінематичних параметрів амортизаторів.

Список літератури

1. Соколова М.М., Хусидов В.Д., Минкин Ю.Г. Динамическая нагруженность вагона. - М.: Транспорт. 1981. - 206 с.
2. Терешкин Л.В., Зеленин И.Г. Механизация и автоматизация производственных процессов при ремонте пассажирских вагонов. - М.: Транспорт. 1984. - 286 с.
3. Соколов М.М., Варава В.И., Левит Г.М. Гасители колебаний подвижного состава. Справочник. - М.: Транспорт. 1985. - 216 с.
4. Челноков И.И. Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов. - М.: Транспорт. 1975. - 72 с.
5. Струтинський В.Б., Колот О.В. Імітаційне математичне моделювання дисипативних характеристик комплектних гідромеханічних систем//Промислова гідравліка і пневматика.- Вінниця, №2, 2003.- С.63-68.
6. Залманзон Л.А. Преобразование Фур’є, Уолша, Хаара и их применение в управлении связи и других областях. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
7. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.
8. Марпл-мл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
9. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей. – М.:Наука, 1968. – 368 с.
10. Плис А.И., Сливина Н.А. MATHCAD 2000 математический практикум для экономистов и инженеров. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 655 с.
11. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

УДК 621.914

П.П. Мельничук, проф., д-р техн. наук, Г.М. Виговський, проф., канд. техн. наук, В.Ю. Лоєв, В.Г. Сніцар, доценти, В.В. Ковальов, ст. викл.
Житомирський державний технологічний університет

Дослідження геометричних характеристик плоских поверхонь після фінішної обробки комбінуванням різання і ППД

В статті наведені результати експериментальних досліджень і впроваджень у виробництво комбінованого методу фінішної обробки плоских поздовжніх поверхонь деталей з загартованих сталей і загартованих і незагартованих чавунів торцевою фрезою з рухомими чистовим і вигладжуючим елементами в порівнянні з традиційним методом – шліфуванням.
фінішна обробка, шліфування, поверхневе пластичне деформування

Фінішна обробка плоских поздовжніх поверхонь деталей машин і механізмів з наперед заданими геометричними і фізико-механічними характеристиками в переважній більшості випадків є визначальною для їх точної і довговічної експлуатації. Отримання при обробці рівноважної шорсткості забезпечує мінімальний час припрацьовування рухомих елементів з виходом процесу зношення на запланований нормальний режим. Ця проблема особливо важлива для прецизійних машин і механізмів. Нормальне припрацьовування характеризується тим [1], що під заново утвореним мікрорельєфом знаходиться щільна, добре заповнена металом основа. Як свідчить досвід, вихідна шорсткість поверхонь тертя має бути $Ra=0,32\div0,08$ мкм. Таку шорсткість плоских поверхонь, як правило, досягають шліфуванням.

При шліфуванні під дією високих температур відбуваються місцеві фазові і структурні перетворення, які проявляються у формі окремих припалів, зниженні твердості поверхонь. В місцях припалів структурні зміни призводять до локальної об'ємної зміни, яка викликає появу внутрішніх неоднакових напружень різних знаків.

В разі перевищення тимчасового опору метала відбувається утворення поверхневих тріщин в центрі або на краях ділянок припалу. Крім того відбувається шаржування поверхні уламками абразивних зерен шліфувального круга, що в свою чергу сприяє прискореному зношуванню поверхонь тертя. Застосування фінішної обробки плоских поздовжніх поверхонь деталей методом фрезерування торцевою фрезою з надтвердих матеріалів з наступним поверхневим пластичним деформуванням (ППД) дозволяє уникнути перерахованих недоліків при шліфуванні. Найбільш прогресивними сучасними методами обробки є комбіновані, поєднуючі різання з ППД.

З метою випробування розробленого авторами комбінованого методу фінішної обробки плоских поздовжніх поверхонь деталей було сконструйовано інструмент для його здійснення, який забезпечує видалення основного припуску на обробку двадцятьма двома різальними елементами з надтвердих матеріалів, нерухомо закріпленими в корпусі фрези з різними вильотами і на різних відстанях від її осі. Чистовий прохід виконується рухомим відносно корпусу різальним елементом, а також виконується вигладжування обробленої поверхні рухомим індентором з алмазного композиційного термостійкого матеріалу АКТМ®, наданого інститутом надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля. До того ж рухи чистового різця і індентора здійснюються за прямолінійними траєкторіями перпендикулярними до вектора поздовжньої подачі.

© П.П. Мельничук, Г.М. Виговський, В.Ю. Лоєв, В.Г. Сніцар, В.В. Ковальов. 2004

Були використані заготовки зі сталі 40Х і чавуну СЧ21, конструкція і технічні вимоги до яких наведені на рис. 1.

Обробка провадилась на верстатах мод. 6Р12 в лабораторії кафедри ТМ і КТС ЖДТУ, мод. 2254ВМФ4 і мод. ГФ2171С6 ВАТ "Мікрон", м. Одеса. Крім зразків заготовок оброблялись і конкретні деталі верстатів, що знаходяться у виробництві.

Конструктивні особливості запровадженого інструменту і переваги запропонованого комбінованого методу обробки викладені в роботах [3, 4].

Стальні і чавунні загартовані заготовки оброблялись на режимах:

– загальна товщина видаленого шару метала $t=0,8$ мм;

– оберти шпинделя $n=250$ об/хв.;

– подача на оберт $S=0,05$ мм/об;

– вигладжувач $R=1,5$ мм;

– сила притискання вигладжувача $P=120$ Н.

Незагартовані чавунні заготовки: $t=0,8$ мм; $n=200$ об/хв.; $S=0,05$ мм/об; $R=2,5$ мм; $P=80$ Н.

Вимірювання параметрів отриманої шорсткості проводилось на установці *Talysurf-6* (Англія) в умовах Житомирського заводу автозапчастин. Результати приведені на профілограмах (рис.2).

З метою визначення впливу попередніх геометричних характеристик оброблюваних поверхонь на завершальну операцію були проведені наступні експерименти:

– обробка поверхні попередньо отриманої після стругання (*Rz 140*);

– обробка поверхні попередньо отриманої після фрезерування (*Ra 2,5*);

– обробка поверхні без вигладжування (без зміни режимів).

Ніяких суттєвих впливів на якість поверхні після фінішної обробки (вигладжування) не отримано.

Шорсткість поверхонь сталевих і чавунних загартованих заготовок оброблених без вигладжування знаходилась в межах *Ra0,8...1,7*, що підтверджує результати досліджень, які виконані в роботі [5].

Як свідчать профілографи (рис. 2), запропонований авторами метод комбінованої обробки плоских поздовжніх поверхонь і розроблений для його втілення у виробництво інструмент з рухомими формоутворюючими елементами, а також оптимізовані режими обробки забезпечують якісні геометричні параметри поверхонь деталей з високою продуктивністю праці.

Відомо [6], що геометричними характеристиками поверхонь, що суттєво впливають на їх експлуатаційні параметри є:

– відносна опорна довжина профілю t_p на рівні p (до середньої лінії);

– відносна опорна частка площі t_f;

– радіус закруглення мікро нерівностей r.

Для наукових досліджень [7] широке застосування для оцінки несучої спроможності шорсткості набули:

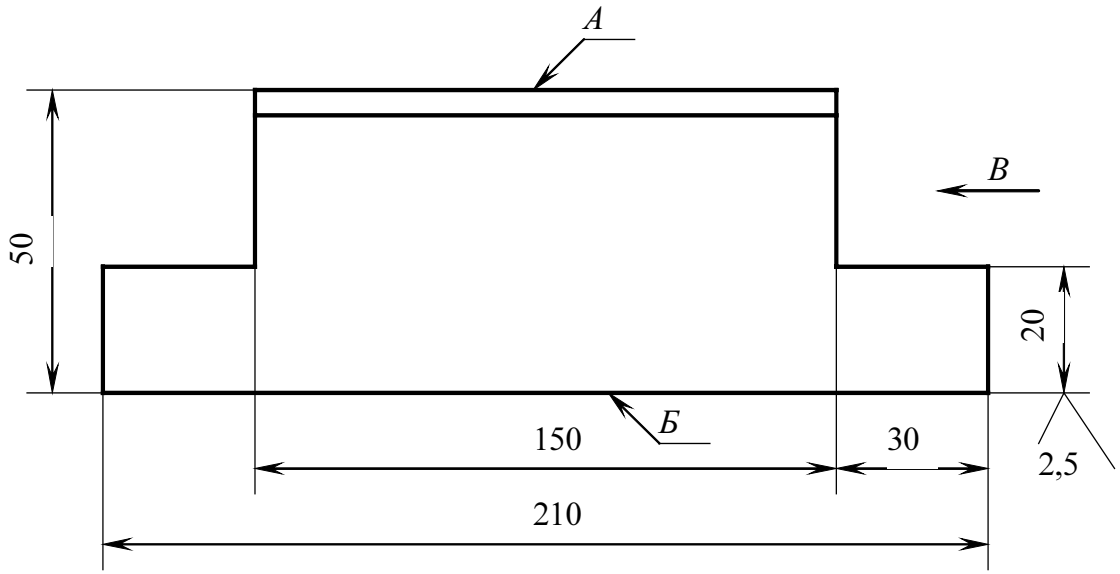
– крива опорної поверхні, побудована у відносних координатах [8] з параметрами її початкової ділянки ν і b

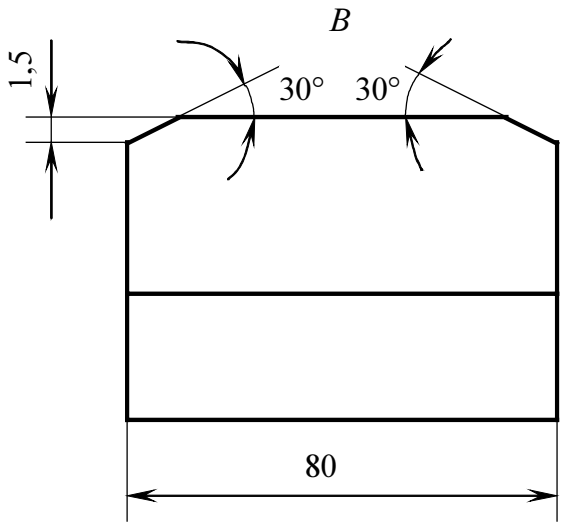
$$t_p = b\varepsilon^{\nu}; \qquad (1)$$

– середні радіуси локальних виступів ρ і середніх виступів ρ_m;

– безрозмірний комплекс Δ.

R_z 20

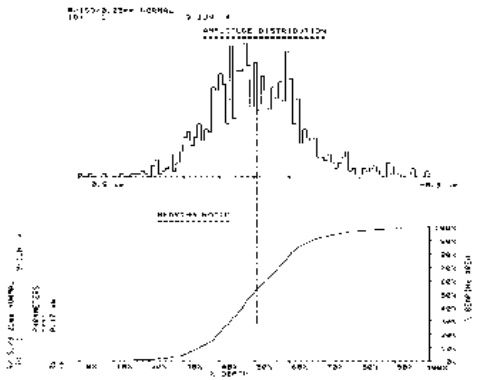


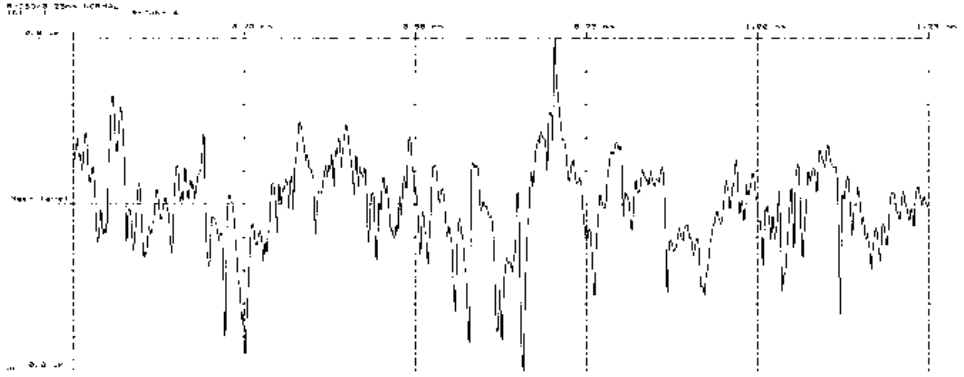


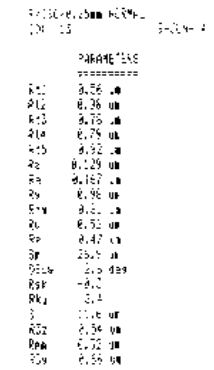
№ п/п	Матеріал	Кількість	Термообробка
1	СЧ 21	2	НВ 170...241
2	Сталь 40Х	2	Пов. А HRC 48…54
3	СЧ 21	2	Пов. А HRC 45…50

1. Похибка паралельності поверхонь А і Б не більше 0,1 мм
2. По одній заготовці (поз. 1,2,3) поверхню А обробити поздовжнім струганням Rz 80…160 (не чистіше), по одній заготовці поверхню А обробити фрезеруванням Ra 2,5.

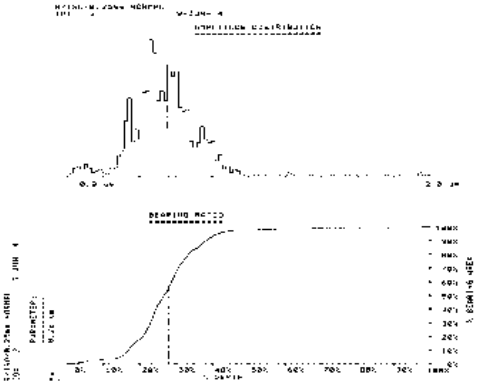
Рисунок 1 – Заготовки

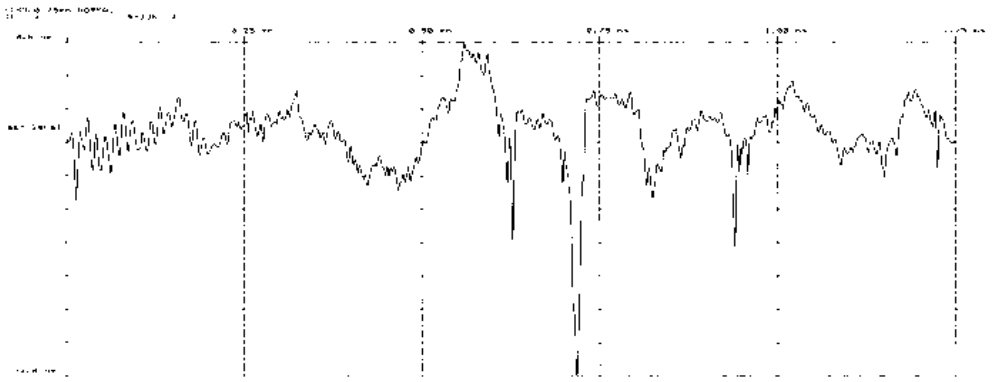


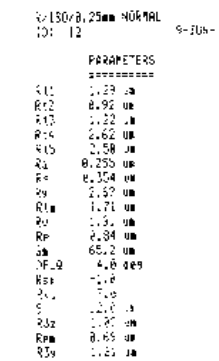




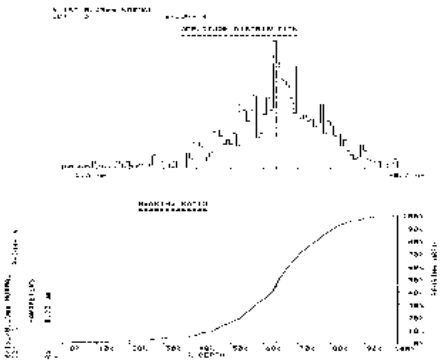
Стальна загартована поверхня

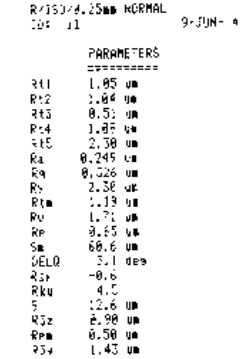






Чавунна загартована поверхня





Чавунна незагартована поверхня

Рисунок 2 – Профілограми

В роботі [10] наведені формули для підрахунків характеристик початкової ділянки кривої опорної поверхні:

$$\nu = 2t_m\left(\frac{R_p}{R_a}-1\right), \tag{2}$$

$$b = t_m\left(\frac{R_{\max}}{R_p}\right)^{\nu}. \tag{3}$$

Для методів обробки, пов'язаних із зняттям стружки $t_m=0,5$

$$\nu = \frac{R_p}{R_a}-1, \tag{4}$$

$$b = 0,5\left(\frac{R_{\max}}{R_p}\right)^{\nu}. \tag{5}$$

Для оздоблювально-зміцнюючих методів обробки, при яких відбувається загладжування вихідної шорсткості $t_m=0,55$

$$\nu = 0,55\left(\frac{R_p}{R_a}-1\right), \tag{6}$$

$$b = 0,55\left(\frac{R_{\max}}{R_p}\right)^{\nu}. \tag{7}$$

В разі взаємодії двох контактуючих поверхонь під навантаженням відбувається їх відносне зближення, позначене у формулі кривої опорної поверхні -ε.

Формула відносного зближення поверхонь має вигляд

$$\varepsilon_n = (b\nu)^{-\frac{1}{\nu-1}}. \tag{8}$$

Для порівняння різних методів обробки плоских поверхонь з точки зору їх впливів на експлуатаційні характеристики була оброблена одна з заготовок (сталь, *HRC 48…54*) методом шліфування з забезпеченням *Ra* в межах *Ra*, отриманого при обробці такої ж заготовки комбінованим методом (рис. 3).

Проведені відповідні розрахунки.

Для шліфованої поверхні: $Ra=0,28$; $R_p=0,92$; $R_{max}=R_y=1,97$; $Rz=R_{tm}=1,82$;

$$\nu = \left(\frac{0,92}{0,28}-1\right) = 2,28;\ b = 0,5\left(\frac{1,97}{0,92}\right)^{2,28} = 2,84;\ \varepsilon_n = (2,84\times 2,28)^{-\frac{1}{2,28-1}} = 0,23.$$

Для поверхні, обробленої комбінованим методом: $Ra=0,255$; $R_p=0,84$;

$R_{max}=R_y=2,62$; $Rz=R_{tm}=1,71$; $\nu = \left(\frac{0,84}{0,255}-1\right) = 2,52$; $b = 0,55\left(\frac{2,62}{0,84}\right)^{2,52} = 9,67$;

$\varepsilon_n = (2,52\times 9,67)^{-\frac{1}{2,52-1}} = 0,12$.

Визначено радіуси кривизни виступів для кожної з площин (r – радіус кругового сегмента, хорда якого дорівнює ширині виступів над середньою лінією)

$$r = \frac{S_m^2 t_m}{16Ra}, \tag{9}$$

Шліфована поверхня

$$r = \frac{16,2^2\times 0,5}{16\times 0,28} = 29,3 \text{ мкм.}$$

Вигладжена поверхня $r = \frac{65,2^2\times 0,55}{16\times 0,255} = 573$ мкм.

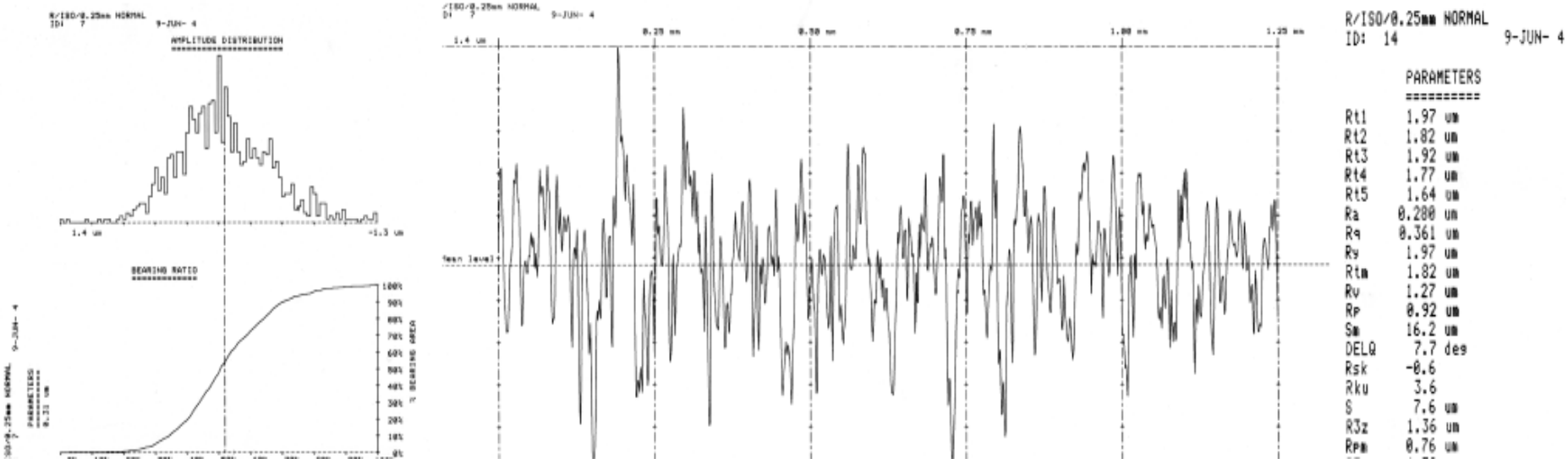


Рисунок 3 – Профілограма поверхні, обробленої шліфуванням

Комплексний безрозмірний критерій оцінки шорсткості поверхні

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{rb^{1/\nu}}. \qquad (10)$$

Для шліфованої поверхні

$$\Delta = \frac{1{,}82}{29{,}3 \times 2{,}84^{1/2{,}28}} = 0{,}03924.$$

Для вигладженої поверхні

$$\Delta = \frac{1{,}71}{573 \times 9{,}67^{1/2{,}52}} = 0{,}001204.$$

Проведені дослідження підтвердили високу якість оброблюваних плоских поздовжніх поверхонь деталей в частині отримання оптимальних геометричних параметрів шорсткості.

Подальші дослідження характеристик і фізико-механічних властивостей оброблених поверхонь запропонованим комбінованим методом (хвилястість поверхні, мікротвердість, залишкові напруження, структура та інше) будуть проведені з врахуванням можливості використання позитивного впливу ефекту Баушингера. Справа в тому, що опір початку пластичної деформації і характер деформаційного зміцнення залежить від попередньої деформації, яка неминуча від попередньої обробки. В разі застосування запропонованого методу чистовий прохід і слідуючий за ним деформуючий прохід співпадають за траєкторіями. У випадку співвісної деформації дислокації накопичуються біля перешкод, в результаті чого підвищується опір деформації в цьому напрямку і зростають залишкові стискаючі напруги.

Список літератури

1. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. –Киев: Наукова думка, 1984.-272 с.
2. Деклараційний патент на винахід “Спосіб плоского фрезерування торцевими фрезами”, 63517А, 7В23С3/00, Бюл. №1, 15.01.2004. Автори Г.М. Виговський, В.Ю. Лоєв, П.П. Мельничук.
3. Мельничук П.П., Виговський Г.П., Лоєв В.Ю. “Дослідження процесу фінішної обробки плоских поверхонь деталей торцевою фрезою з комбінованою схемою різання та вигладжування”. Вісник ЖДТУ №1 (28), Житомир 2004.– С. 44-53.
4. Лоєв В.Ю. Удосконалення комбінованого методу обробки плоских поверхонь деталей різанням і поверхневим пластичним деформуванням. Вісник ЖДТУ №2 (29) Житомир 2004.– С. 29-36.
5. Громовий О.А. Розробка чистових косокутних торцевих фрез з комбінованими схемами різання. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н., Київ 2002.– 16 с.
6. Афтаназів І.С., Гавриш А.П., Мельничук П.П. і ін. “Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням.” ЖІТІ 2001.– 516 с.
7. Суслов А.Г. “Технологическое обеспечение параметров состояние поверхностного слоя деталей.” –М. Машиностроение, 1987, 208 с.
8. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Физика, химия и механика поверхности твердого тела. –Луганск, ВУГУ 2000.– 624 с.
9. Комбалов В.С. Оценка трибологических свойств контактирующих поверхностей. М. Наука 1982.– 136 с.
10. Комбалов В.С. Инженерные расчеты в триботехнике; Научно-технологический процесс в машиностроении. Выпуск 19, М.– 1990.– 152 с.

УДК 621. 95

В.Н. Тихенко, А.П. Гнатюк, канд. техн. наук, доценты, М.В. Королькова, асп.
Одесский национальной политехнический университет

Управление гидроприводом подачи инструмента в станке для глубокого сверления

В статье рассмотрены проблемы управления процессом обработки глубоких отверстий, а именно сверления и растачивания. Для повышения эффективности станков для глубокого сверления предложена адаптивная система управления процессом глубокого сверления.
глубокое сверление, глубокое растачивание, адаптивная система

Управление процессом обработки глубоких отверстий до настоящего времени остается сложной технической проблемой [1,2,3]. Особенно это относится к сверлению деталей из труднообрабатываемых вязких сталей и сплавов, а также из тугоплавких, например, титана, ниобия или тантала. Непрерывное совершенствование способов и технологической оснастки для обработки глубоких отверстий привело к появлению большого количества инструментов, которые различаются по принципу работы и конструктивным исполнением. Использование более прогрессивных инструментов с механическим креплением твердосплавных пластин, предлагаемых ведущими мировыми производителями, позволяет повысить производительность операции в три и более раз по сравнению с инструментами из быстрорежущей стали [2]. Однако широкое внедрение в производство таких инструментов тормозится недостаточными возможностями технологического оборудования. Сложности процессов глубокого сверления и растачивания связаны с тем, что режущие элементы инструментов работают в очень тяжелых условиях, а мониторинг процесса затруднен. О характере протекания процесса и состоянии режущих элементов можно косвенно судить только по виду вымываемой стружки. Возникающие на этих операциях огранка, вибрации и нарушения непрерывного отвода стружки из зоны обработки ускоряют изнашивание режущих элементов. Стружка может «пакетироваться» в стружкоотводных каналах и служить причиной поломки инструмента или снижения качества обработанной поверхности. В связи со сложностью технологического процесса и высокой стоимостью инструментов для обработки глубоких отверстий продление срока их службы имеет большое значение как с точки зрения обеспечения требуемой производительности, так и снижения удельных затрат на инструмент (затрат, отнесенных к одному метру длины обработанного отверстия).

При глубоком сверлении и растачивании на инструмент действует осевая сила F и крутящий момент M. Осевая сила F представляет собой сумму осевых составляющих силы резания и трения, а момент M – сумму моментов от сил резания и трения на направляющих. Для предотвращения поломок инструмента при изнашивании и выкрашивании режущей части, забивании сверла стружкой станки для глубокого сверления могут оснащаться встроенными предохранительными устройствами, которые отключают подачу инструмента при превышении заданного значения F или M. Однако такие механические устройства усложняют конструкцию технологической системы и не обладают высокой надежностью.

В процессе обработки на привод подачи станка действуют возмущающие воздействия, которые могут меняться в широких пределах. К ним относятся изменения твердости НВ материала обрабатываемой заготовки, переменная жесткость c

© В.Н. Тихенко, А.П. Гнатюк, М.В. Королькова. 2004

технологической системы, колебания припуска *h*, определяющие колебания глубины резания, изменяющаяся режущая способность инструмента и др. Это создает большие затруднения при обеспечении требуемой прямолинейности и правильного положения оси отверстия. Обычно режимы резания назначают исходя из принципа разумной осторожности, то есть предполагают худшие условия протекания процесса (обработка на заниженных режимах резания) с целью повышения стойкости инструмента.

Целью данной статьи является изложение алгоритмической сущности, разработанной системы управления процессом сверления глубоких отверстий, принципов выбора критериев и ограничений. Цикл работ в этом направлении проводился в Одесском национальном политехническом университете в рамках целевой комплексной программы «Совершенствование технологических процессов обработки глубоких отверстий».

Так как выбор средств измерения имеет важнейшее значение для реализации задач управления процессом глубокого сверления, то на первом этапе проводились исследования различных вариантов измерительных устройств. Измерение величины осевой силы и крутящего момента возможно при использовании динамометра с тензометрическими датчиками [1]. Недостатком такой схемы измерения является то, что для повышения чувствительности рабочие участки на корпусе динамометра должны иметь необходимую податливость, а это уменьшает жесткость технологической системы. Индуктивные датчики крутящего момента также имеют упругий элемент, снижающий жесткость технологической системы, поэтому область их применения ограничена. Магнитоупругие датчики крутящего момента позволяют производить измерения с точностью 1,5-2% (при постоянной времени меньше 0,01 с) и практически без ухудшения статической и динамической жесткости технологической системы). Сигнал от датчика может использоваться в системе управления без дальнейшего усиления, однако такие датчики значительно дороже. Способы измерения характеристик процесса резания по току приводного электродвигателя отличаются простотой исполнения, но приводят к большим погрешностям, вносят запаздывание в систему автоматического регулирования. Наиболее простым решением, позволяющим избежать встройки в технологическую систему дополнительных устройств, является использование обратной связи по давлению рабочей жидкости в полости гидроцилиндра подачи.

Для повышения эффективности станков для глубокого сверления была предложена адаптивная система управления, блок-схема которой представлена на рис. 1.

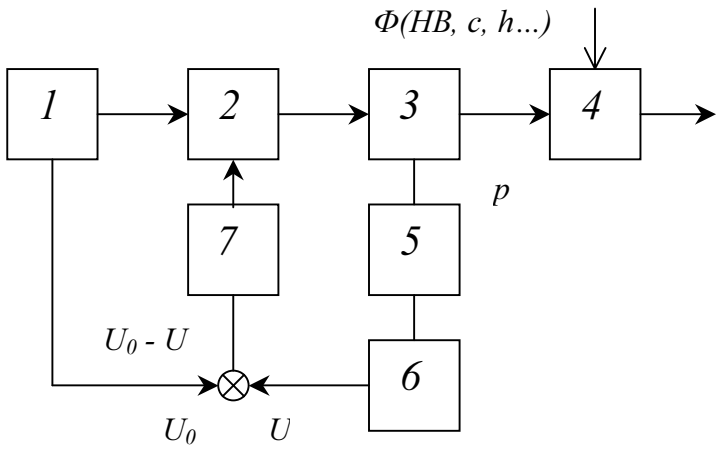


Рисунок 1 - Блок-схема системы автоматического управления

Первоначальная информация о режимах резания (скорости *v* и подаче *s*) от задающего устройства 1 передается в управляющее устройство 2, которое управляет электрогидравлическим приводом подачи 3 инструмента. Величина давления в полостях исполнительного гидроцилиндра пропорциональная величине осевой составляющей усилия резания измеряется при помощи датчика давления 5. Сигнал *U* с выхода датчика 5 усиливается с помощью усилителя 6, включенного в измерительный тракт, и затем поступает на один из входов сравнивающего устройства. На другой вход подается опорный сигнал U_0 - пропорциональный заданному значению осевой силы. На выходе сравнивающего устройства действует сигнал рассогласования, определяемый разностью сравниваемых величин U_0 - *U*, который через регулирующее устройство 7 передается на управляющее устройство 2. Электрогидравлический привод 3 воздействует на технологическую систему станка 4 таким образом, чтобы управляющая величина, функционально связанная с управляемой (выходной), изменялась в таком направлении, при котором она поддерживается на заданном уровне.

Влияние целого ряда факторов *Ф*, действующих на технологическую систему, как случайных так и систематических приводит к отклонениям процесса от заданного и, следовательно, к появлению сигнала рассогласования. Однако наличие в системе управления обратной связи по давлению в исполнительном гидроцилиндре снижает влияние возмущений и стабилизирует выходную величину.

Важным моментом при управлении технологическим процессом является выбор заданного значения осевой составляющей усилия резания F_0. Для конкретных условий эта величина может быть определена на основании экспериментальных исследований зависимости осевой составляющей усилия резания *F* от производительности обработки (произведения скорости резания *v* на подачу *s*). Типовая зависимость *F=f(vs),* представленная на рис.2, имеет нелинейный характер, но может быть реализована микропроцессорным устройством, например, программируемым контроллером.

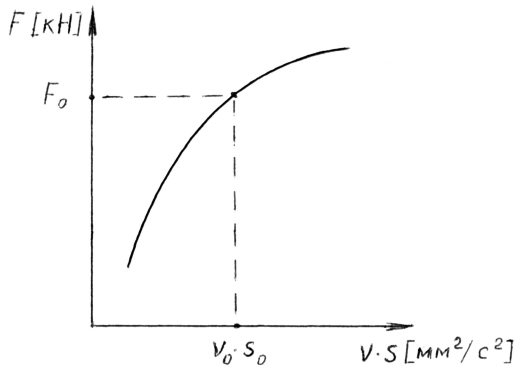


Рисунок 2 - Зависимость осевой силы резания от производительности обработки

С точки зрения снижения интенсивности вибраций и получения наибольшей производительности целесообразно вести обработку с меньшими подачами *s* и с большей скоростью резания *v*. Ограничениями могут быть зоны неустойчивости, то есть те сочетания параметров процесса резания и жесткости технологической системы, при которых возникают автоколебания. Они могут быть определены экспериментально на станке и внесены в память микропроцессорного устройства.

Аналитические исследования динамической системы станка позволяют сделать вывод о том, что в случае, если жесткость резания меньше величины осевой составляющей силы резания, то при любой скорости обработки автоколебания не возникают. Это может служить критерием, позволяющим определить зону устойчивой работы [3].

Дополнительным преимуществом рассмотренной системы автоматического управления является то, что она совместима с управлением процессом вибрационного сверления. Этот процесс отличается от обычного тем, что инструменту сообщаются дополнительные гармонические колебания вдоль оси инструмента с определенной амплитудой и частотой [4,5,6]. При этом обеспечиваются надежное дробление стружки, доступ СОЖ к режущим кромкам и удаление ее вместе со стружкой, что способствует лучшему охлаждению режущей части сверл и повышению их стойкости. Электрогидравлический привод для исследовательского стенда был создан на базе следящего гидроусилителя с дросселирующим распределителем [6]. Втулка распределителя закреплялась на упругих мембранах, что позволяло воздействовать на нее при помощи электромеханического преобразователя по сигналу от управляющего устройства. Для реализации обратной связи по давлению полости исполнительного гидроцилиндра соединялись каналами с полостями, образованными мембранами. Дополнительные гармонические колебания создавались при помощи вращающегося эксцентрика, связанного с золотником дросселирующего распределителя.

Результаты моделирования на ПЭВМ показали, что дополнительные низкочастотные колебания, частота которых далека от резонансных частот технологической системы, не вызывают нарушения стабильности системы автоматического управления. Использование ее в станках для глубокого сверления позволит повысить производительность обработки, увеличить точность и улучшить шероховатость поверхности обрабатываемых отверстий. Кроме того, отверстия высокой точности могут быть получены за один проход в автоматическом режиме взамен многооперационной обработки, снижается вероятность выкрашивания режущих частей и поломки инструментов. Систему управления можно реализовать как при проектировании нового оборудования, так и при модернизации станков для глубокого сверления уже находящихся в эксплуатации.

Список літератури

1. Обработка глубоких отверстий/ Под. ред. Н. Ф. Уткина.– Л.: Машиностроение, 1988.– 269с.
2. Азарова Е. В. Прогрессивный инструмент и оборудование для глубокого сверления// Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2004, №6 (52). – С. 24-25.
3. Кондратюк О. Л. Об устойчивости процесса глубокого сверления на малых агрегатных станках//Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2004, №6(52). – С. 22-23.
4. Подураев В. Н. Автоматические регулируемые и комбинированные процессы резания. – М.: Машиностроение, 1977.–304 с.
5. Литвинов Л. П. Вибросверление глубоких отверстий//Вестник машиностроения. 1990. №5. – С. 22-24.
6. Тихенко В. Н., Гнатюк А. П. Исследование гидропривода станка для обработки глубоких отверстий//Вибрация в технике и технологиях.– Винница, ВГАУ. – 2003, №2(28). – С. 66-68.

УДК 621.775.8

Н.В. Шепельський, проф., д-р техн. наук, В.В. Свяцький, Л.П. Свяцька
Кіровоградський національний технічний університет

Вплив деформаційних умов і виду розділового середовища на контактне схоплювання адгезійно-сумісних металів

Проведена експериментальна перевірка моделі контактного схоплювання адгезійно-сумісних металів на прикладі пресування дискретного середовища.
адгезія, механічні випробування, поверхня контакту, пресування, схоплювання

У роботі [1] нами запропонована модель, що дозволяє прогнозувати величину схоплювання деформованих волокон в процесі пресування гранул. Модель дозволяє розраховувати величину схоплювання на зсув по перетину волокнової випресовки із урахуванням формування зв'язків між контактними поверхнями в процесі їхньої сумісної пластичної деформації.

Дана робота присвячена експериментальній перевірці теоретичної моделі [1] адгезійної взаємодії металевих гранул при їх пресуванні на волокна.

Вплив деформаційних умов і виду розділового середовища на характер адгезійного зв'язку волокон, що деформуються, оцінювали за допомогою механічних випробувань. Пресування литих гранул на волокна проводили з використанням таких розділових середовищ: графіт дрібнозернистий ТУ 48-20-51-84; окисел цинку ОКП 26 1121 1081 05 ГОСТ 10262-73; карбонільне залізо Р-100Ф1 ГОСТ 13610-79; карбонільний нікель ПКН-ОТ1 ГОСТ 9722-79; ферит КМК-Б20 ГОСТ 13333-75; порошок кобальтовий ПК-1У ГОСТ 9721-79, а також використовували суспензії вище перелічених речовин в технічному гліцерині. Вибір графіту і окислу цинку обґрунтований широким їхнім використанням в процесах обробки металів тиском як мастило та порівняльно низькою вартістю, решта розділових середовищ є хімічно чистими тонкодисперсними порошками стійкими до свинцю.

Випробування проводили як на стиснення, так і на розтягування зразків. Визначення величини адгезійного зв'язку відпресованих волокон за кривими руйнування та кількісну оцінку адгезійного зв'язку деформованих волокон проводили з використанням світлопроменевого осцилографа Н071.2, тензопідсилювача ТОПАЗ-3-02 і джерела струму АГАТ.

В ході механічних випробувань на стиснення передбачалося, що напруження у волокновому зразку для малих степенів деформацій можна уподібнити зміцнюючій дії поверхні контакту деформованих гранул.

Визначення адгезійного зв'язку деформованих ниток проводили на пристрої, схема якого приведена на рис. 1. Пристрій змонтований на універсальній випробувальній машині УИМ-50 номінальним зусиллям 0,5 МН. Пристрій складається із гвинта 1, кільця 2, діафрагми 3, корпуса 4. Визначення величини адгезійного зв'язку проводили по методиці й відповідно до вимог механічних випробувань металів на стиснення по ГОСТ 25.503-80 [2]. За зразки для випробувань застосовували циліндрові зразки, вирізані з випресовок, діаметром від 5 до 10 мм і висотою від 15 до 30 мм (тип II по ГОСТ 25.503-80).

© Н.В. Шепельський, В.В. Свяцький, Л.П. Свяцька. 2004

Після стиснення волокнових зразків на пристрої (див. рис. 1) визначали фізичну межу міцності волокнового зразка за формулою:

$$\sigma_{в} = \frac{P}{F_0},$$

де P –зусилля стиснення, Н;

F_0 –початкова площа перерізу волокнового зразка, мм^2.

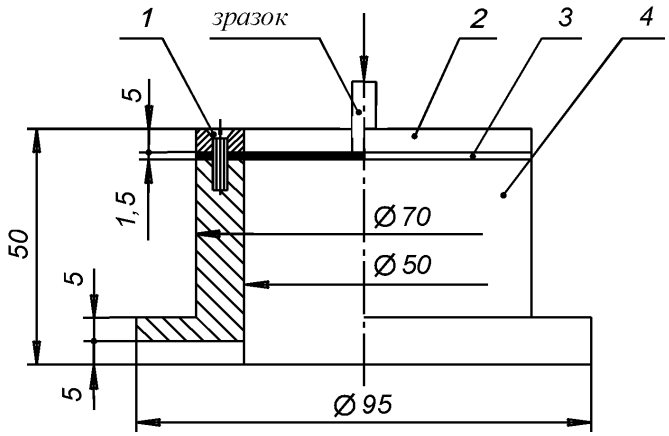
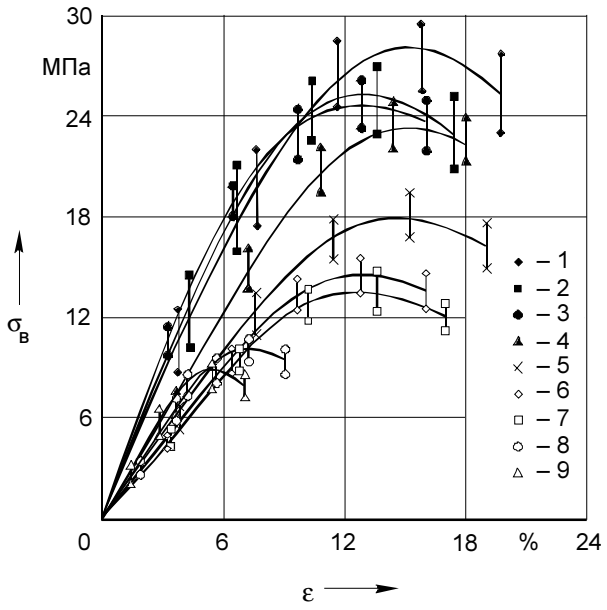


Рисунок 1 – Схема пристрою для визначення величини адгезійного зв'язку волокон у випресовці

Відмічено, що характер руйнування відпресованих зразків з розділовою фазою у вигляді суспензії ферит-гліцерин, подібний руйнуванню зразків, одержаних з суспензією карбонільний нікель-гліцерин. Зразки, одержані за допомогою розділових середовищ у вигляді суспензій графіт-гліцерин і карбонільне залізо-гліцерин, при осадженні руйнувалися на окремі нитки.

На рис. 2 показані залежності меж міцності поверхні контакту волокнових зразків від деформаційних умов отримання волокон та виду розділового середовища.

Кількісну оцінку адгезійного зв'язку деформованих волокон в пресовці проводили на пристрої, схема і загальний вид якої приведені на рис. 3. Пристрій для визначення величини адгезійного зв'язку волокон у випресовці складається із станини 1, планок 2, 4, 10 та 12, месдози 3, прокладки 6, направляючих 7, розривних губок 8 (комплект), повзунів 5 та 9, гвинта 11, важеля 13. За зразки для проведення випробувань застосовували порожнисті циліндри висотою 7,5 мм, зовнішнім діаметром 5 мм і внутрішніми діаметрами 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 мм. Механічні випробування порожнистих циліндрів на розрив проводили в такій послідовності: початкові зразки встановлювали на розривні губки 8 і приводили в обертання гвинт 11 за допомогою важеля 13. Повзуни 5 і 9 мають нагоду вільної поступальної ходи в направляючих 7. Зусилля розтягання через гвинт 11, повзун 9, початковий зразок, повзун 5 передається на месдозу 3. За допомогою тензоапаратури проводили реєстрацію зусилля розриву порожнистих зразків. Після механічних випробувань проводили їх статистичну обробку згідно нормальному закону розподілу по ГОСТ 25.503-80. На жаль, для волокнових випресовок, одержаних за допомогою розділових середовищ-суспензій карбонільне залізо-гліцерин і графіт-гліцерин не вдалося визначити середнє значення меж міцності поверхні контакту деформованих волокон унаслідок їхнього значного розкиду.



Розділове середовище: 1 – без розділового середовища; 2 – окисел цинку; 3 – суспензія окис цинку-гліцерин; 4 – графіт; 5 – суспензія порошок кобальту-гліцерин; 6 – суспензія карбонільний нікель-гліцерин; 7 – суспензія ферит-гліцерин; 8 – суспензія графіт-гліцерин; 9 – суспензія карбонільне залізо-гліцерин.

Рисунок 2 – Залежність меж міцності волоконних зразків від виду розділового середовища (при $\mu = 81$, $\varphi_3 = 60°$)

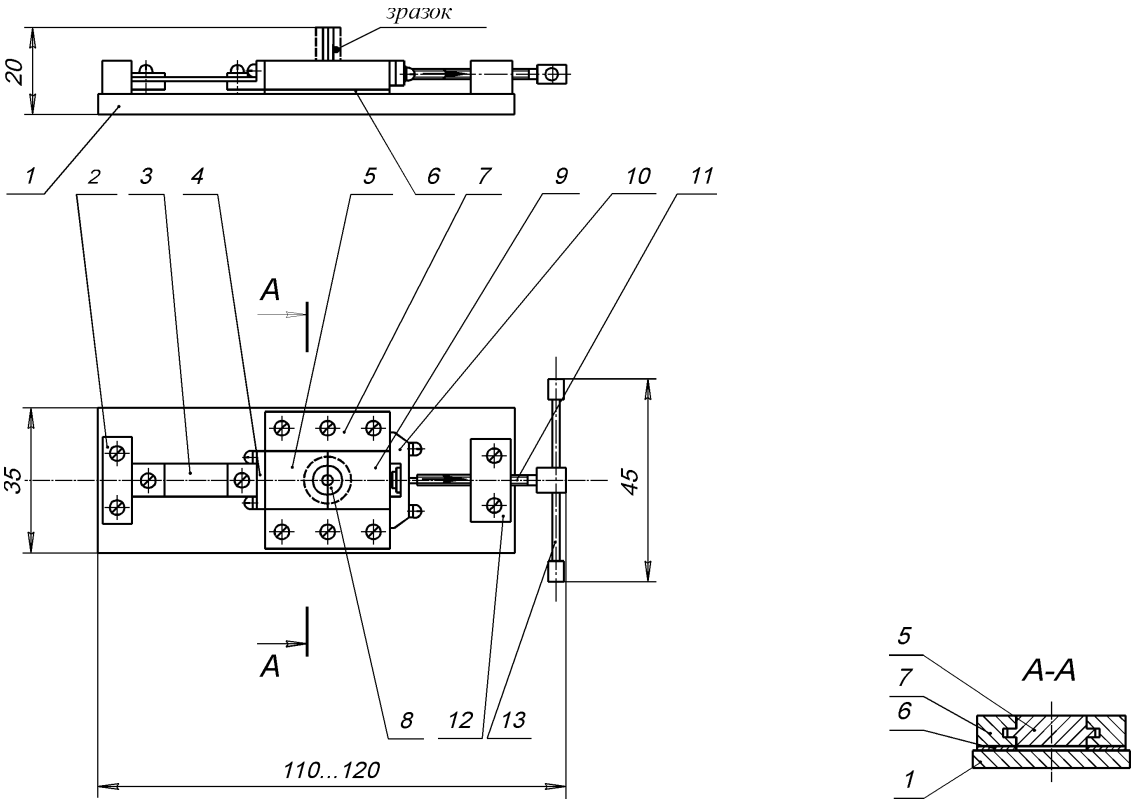


Рисунок 3 – Схема пристрою для визначення величини адгезійного зв’язку деформованих волокон

На рис. 4 показаний порядок побудови епюри величини адгезійного зв'язку поверхні контакту волокон по поперечному перетину волокнової випресовки згідно даних статистичної обробки результатів механічних випробувань. На епюрах величин адгезійного зв'язку поверхні контакту волокон вузлові точки апроксимували залежністю $\sigma_в = a \cdot \exp(R) + b$ і таким чином одержували усереднену епюру адгезійного зв'язку поверхні контакту волокон по перерізу відпресованого зразка з різними розділовими середовищами. Ці епюри для порівняльного аналізу згруповано на рис. 5.

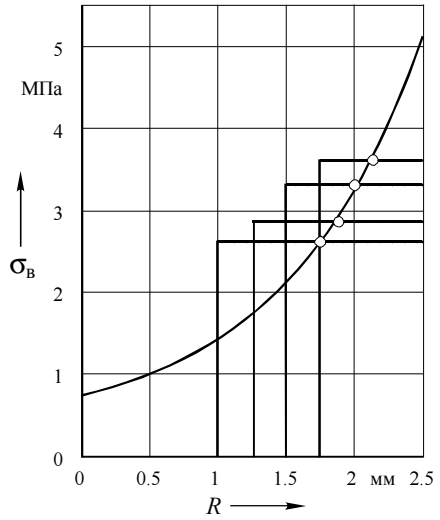


Рисунок 4 – Порядок побудови епюри величини адгезійного зв'язку поверхні контакту волокон по перерізу випресовки (при μ = 81, φ_3 = 60°, пресування без розділового середовища)

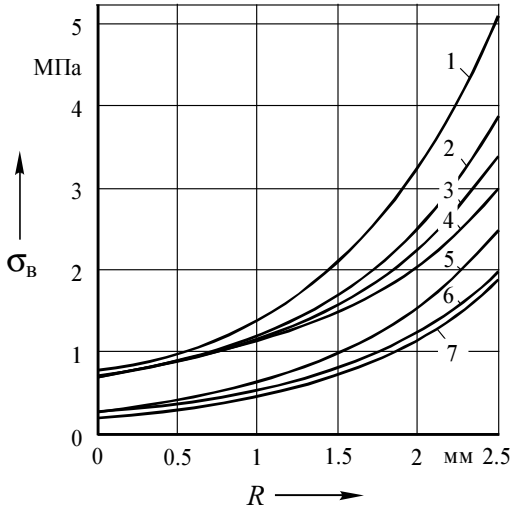


Рисунок 5 – Залежність усереднених епюр величин адгезійного зв'язку поверхні контакту волокон по перерізу зразка від виду розділового середовища (1 – 7 див. рис. 2)

Таким чином результати механічних випробувань на розрив підтвердили (тотожно) аналітичну залежність характеру розподілу коефіцієнта міцності схоплювання деформованих волокон по перетину волокнової випресовки. Результати механічних випробувань дозволили визначити чисельні значення величин адгезійного зв'язку деформованих волокон залежно від деформаційних умов пресування та виду розділового середовища. Запропоновані аналітичні залежності [1] та методики механічних випробувань волокнових випресовок дозволяють створити передумови для розробки технологічних процесів пресування гранул на волокна з різних металів і їх сплавів та методи управління цими процесами.

Список літератури

1. Особливості контактного схоплювання при зсувних деформаціях адгезійно-сумісних металів / Шепельський М.В., Свяцький В.В., Свяцька Л.П., Пукалов В.В. / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: Зб. наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. – Кіровоград: КДТУ, 2004. – Вип. 14. – С. 241 – 245.
2. ГОСТ 25.503-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний. Метод испытания на сжатие. Введ. 01.07.81. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 55 с.

УДК 621.919

Я.Б. Немировский, канд. техн. наук
Институт свертвердых материалов НАН Украины,
А.В. Чернявский, доц., канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Особенности обработки гильз ДВС деформирующим протягиванием

В статье рассмотрены условия, необходимые для использования операции деформирующего протягивания в техпроцессе обработки чугунных гильз ДВС. Осуществлен выбор схемы протягивания, разработана конструкция инструмента, оценено влияние нового техпроцесса на качественные характеристики рабочей поверхности гильзы: параметры микрорельефа, механические свойства поверхностного слоя. Приведены результаты производственных испытаний.
деформирующее протягивание, режущий инструмент, техпроцесс, поверхностный слой детали, микрорельеф

Повышение производительности обработки гильз и цилиндров ДВС, которые в большинстве случаев изготавливаются из специального модифицированного чугуна, имеет большое практическое значение.

Традиционный технологический процесс обработки таких деталей – включает операции зенкерования, растачивания, шлифования, двух-трех, а иногда и четырехкратного хонингования. Для снижения трудоемкости обработки, а также повышения качества изделий необходимо внедрить в техпроцесс обработки гильз ДВС операцию деформирующего протягивания ДПР, вместо применяемых малопроизводительных операций по обработке отверстия гильзы.

Внедрение операции ДПР при обработке внутренней полости гильз ДВС требует решения следующих задач:

- выбрать схему деформирования;
- разработать конструкцию инструмента;
- установить влияние ДПР на состояние рабочей поверхности гильз;
- провести производственные испытания разработанного техпроцесса.

Существующий в условиях 3-го Киевского авторемонтного завода технологический процесс обработки отверстия Λ100 в гильзе при ее восстановлении в I ремонтный размер, предусматривает следующие операции:

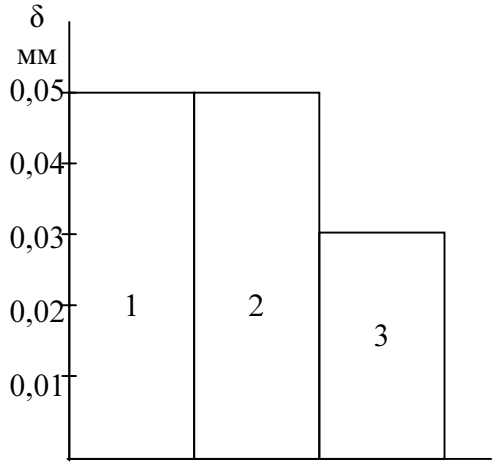
1. Расточка в размер $\Lambda 100{,}44^{+0{,}06}$ мм.
2. Черновое хонингование в размер $\Lambda 100{,}5^{+0{,}04}$ мм.
3. Чистовое хонингование в размер $\Lambda 100{,}5^{+0{,}06}$ мм.

В работах [1,2] показано, что применение ДПР в качестве одной из финишных операций в техпроцессе обработки отверстий в неравножестких деталях из чугуна, возможно только при обеспечении высокой геометрической точности отверстий на предыдущих операциях. Для реализации этого условия, используем режущий элемент, установленный впереди группы деформирующих элементов соосно с ними. При таком варианте схемы режущий элемент должен срезать необходимый припуск и, как указывают авторы работы [3], обеспечить требуемый размер и геометрическую точность отверстия. Это стабилизирует натяг на деформирующие элементы, расположенные за режущим, что обеспечивает необходимую раздачу отверстия, шероховатость поверхности.

© Я.Б. Немировский, А.В. Чернявский. 2004

Возможность обеспечить необходимую деформацию для группы деформирующих элементов, расположенных за режущим элементом, позволяет выбрать количество деформирующих элементов и натяги на них с позиций достижения суммарного контактного давления, обеспечивающего требуемую шероховатость и упрочнения обработанной поверхности [4]. Следует отметить, что значение необходимой деформации отверстия, ограничивается ресурсом пластичности, оценка которого приведена в работе [1].

Однако, как показали эксперименты (рис. 1), такая схема не обеспечила геометрической точности обработанной гильзы, ввиду появления овальности отверстия, значение которой превосходило допустимое.



1 – режущий элемент с передней направляющей; 2 – режущий элемент с последующей группой деформирующих элементов; 3 – деформирующие элементы – режущий элемент – деформирующие элементы.

Рисунок 1 – Изменение погрешностей отверстия при различных схемах обработки

Появление этой погрешности прежде всего связано с отклонениями от осесимметричного деформирования материала, обусловленными уводом режущего элемента от оси детали из-за неравномерного припуска под обработку.

Используя рекомендации, приведенные в работе [6] и касающиеся путей повышения точности, при ДПР, впереди режущего элемента размещаем еще одну группу деформирующих элементов. Эта дополнительная группа принудительно центрирует деталь относительно оси инструмента, обеспечивая их соосность, что в свою очередь устраняет отклонения от осесимметричной обработки режущим элементом. Кроме того, предварительная пластическая деформация поверхностного слоя улучшает стружкообразование при резании [7], повышает стойкость режущего инструмента и улучшает микрорельеф обработанной поверхности.

Эксперименты по испытанию этой схемы подтвердили рекомендации приведенные в работе [6]. Погрешности отверстия не превышали допустимых (рис. 1).

Таким образом оптимальной схемой для протягивания гильз ДВС из чугуна является схема, включающая последовательно размещенные и жестко связанные между собой: группу деформирующих элементов, режущий элемент и вторую группу деформирующих элементов, ответственную за качество обработанного отверстия. На основании этой схемы была разработана конструкция деформирующе-режущей-деформирующей прошивки для обработки гильз автомобиля ЗИЛ 130.

С учетом выбранной схемы обработки, а также выполненных исследований по стружкообразованию при срезании припуска режущим элементом [8], разработана конструкция инструмента, представленная на рис. 2.

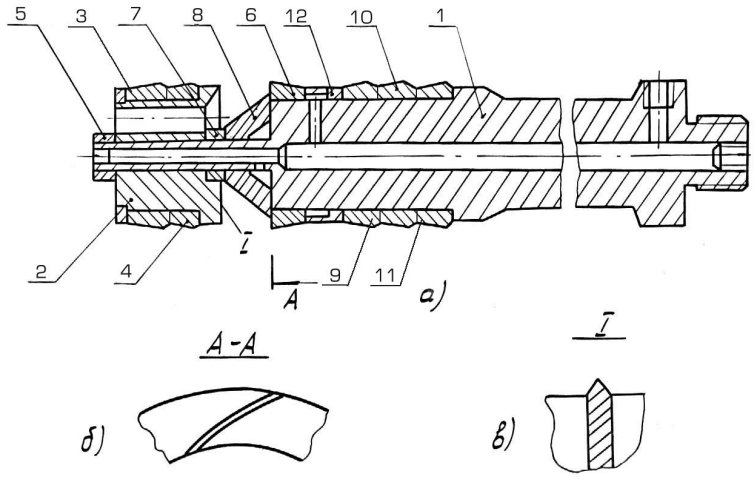


Рисунок 2 – Инструмент для обработки отверстий в гильзах ДВС ЗИЛ 130

Протяжка (рис. 2.) имеет полую ступенчатую оправку 1 с центральными радиальными отверстиями для подвода смазочно-охлаждающей жидкости. На оправке установлена кассета 2 с деформирующими элементами 3 и 4, закрепленными на кассете гайкой 5. Соосно деформирующим элементам 3 и 4 расположен режущий элемент 6, удаленный от деформирующего элемента 4 дистанционной втулкой 7 и прижимным фланцем 8. За режущим элементом 6 расположена группа деформирующих элементов 9, 10, 11 удаленных от него дистанционной втулкой 12. Все рабочие элементы на оправке закрепляются гайкой 13. Прижимной фланец 8 и дистанционная втулка 12 имеет на торцах спиральные пазы для подачи СОЖ на обрабатываемую поверхность. На торцовой поверхности кассеты, обращенной к режущему элементу 7 расположены три стружколома, а также три сквозных отверстия для частичного выхода измельченной стружки.

Диаметры деформирующих и режущего элемента приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Диаметры рабочих элементов протяжки для обработки гильзы ДВС ЗИЛ 130

Диаметры рабочих элементов	Д, мм	Д, мм	Д, мм
I группа деформирующих элементов	100,15	100,20	-
Режущий элемент	100,42		
II группа деформирующих элементов	100,47	100,52	100,57

Для обработки изделий из чугуна авторы работ [1,2] рекомендуют применять малые натяги на элемент (а≤0,05мм). В этом случае, очаг деформации характеризуется наличием незначительных зон внеконтактной деформации, следовательно, влияние угла α на точность отверстия становится слабым [6]. Поэтому с позиций достижения необходимой шероховатости используем для второй группы деформирующих элементов угол $\alpha = 4^{o}$. Даже использование такого значения угла α не позволяет достичь требуемой шероховатости $R_a \leq 0{,}9$ мкм. малым количеством деформирующих элементов. Как показали эксперименты для достижения требуемой шероховатости необходимо, чтобы II группа состояла не менее чем из 5-и деформирующих элементов.

Это увеличивает трудоемкость операции и затраты на инструмент. Как отмечалось выше использование малых натягов для обработки изделий из чугуна приводит к незначительным размерам внеконтактных зон, что в свою очередь обеспечивает стабильную усадку обработанного отверстия, то есть диаметр обработанного отверстия всегда меньше диаметра последнего деформирующего элемента. Так при последовательном протягивания гильз ДВС ЗИЛ 130 с диаметром d_0 = $100{,}42^{+0{,}02}$мм деформирующими элементами с диаметрами цилиндрической ленточки $Д_э$ = 100,47; 100,52; 100,57 мм получен диаметр отверстия $d_{отв}$ = $100{,}45^{+0{,}02}$мм, при этом усадка отверстия составила Δ_y = 0,12 мм.

Так как разработанный инструмент жестко связан с исполнительным органом, то это приводит к необходимости обратного (холостого) хода инструмента через обработанную деталь. Наличие стабильной усадки отверстия с одной стороны и обратного хода инструмента, через обработанное отверстие с другой создает реальные условия для осуществления дополнительной пластической деформации обработанной поверхности. Для этого используем рекомендации работы [8] по выбору угла обратного конуса α_1. Согласно этим рекомендациям $\alpha_1 > \alpha$. В этом случае контакт обработанного конуса с обрабатываемой поверхностью будет происходить по значительно меньшей площади контакта чем при рабочем ходе. Уменьшение площади контакта приводит к соответствующему росту контактных давлений и к появлению дополнительной пластической деформации микронеровностей. Оптимальный диапазон значений угла α_1 в зависимости от угла α определяется по экспериментально полученной в работе [8] зависимости:

$$\alpha = (3{,}24 \div 3{,}96)\alpha^{0{,}74}. \qquad (1)$$

Исходя из зависимости (1), угол α_1 был принят равным 10^o.

Как показали эксперименты, используя деформирующие элементы с углами α_1, выбранными по зависимости (1) можно достичь требуемой шероховатости тремя деформирующими элементами.

Испытания работоспособности разработанного инструмента проводились в процессе обработки опытной партии гильз ДВС ЗИЛ 130, восстанавливаемых в I-й ремонтный размер применительно к условиям 3-го Киевского авторемонтного завода. Изготовленная согласно рис. протяжка закреплялась резьбовым хвостовиком в штоке станка мод. МА7У75ОБ. В качестве технологической смазки использовалась 5% эмульсия, подаваемая в зону обработки под давлением непосредственно через внутреннюю полость оправки. Операция протягивания выполнялась вместо операции растачивания, предусмотренной заводским технологическим процессом.

К точности обработки отверстий гильз ДВС ЗИЛ 130 предъявляются высокие требования. Отверстие гильзы, восстановленное в I ремонтный размер, должно иметь диаметр $100{,}5^{+0{,}06}$, а отклонение формы в продольном и поперечном сечениях не должно превышать 0,02 мм.

Результаты обработки показали, что операция протягивания позволяет стабильно обеспечить диаметр обработанного отверстия гильзы в пределах d = $100{,}46^{+0{,}04}$. Погрешность отверстия находится в пределах δ = 0,03 мм. Это недостаточно для удовлетворения требований, предъявляемых к окончательной точности отверстия гильзы. Кроме того, анализ профилограмм рабочей поверхности гильз позволил обнаружить на обработанной поверхности наличие кольцевых выступов. По-видимому причиной образования таких погрешностей является перепад толщины стенки по длине детали, а также изменением силы протягивания в процессе обработки.

Образованные в результате протягивания выступы на рабочей поверхности гильзы легко устраняются в процессе последующего хонингования, так как их высота h $\leq$ 15 мкм соизмерима с величиной припуска снимаемого хонингованием.

Для реального внедрения разработанного техпроцесса обработки гильз ДВС с использованием пластического деформирования оценивались и другие показатели качества обработанных гильз.

В табл. 2 приведены параметры геометрических и механических характеристик поверхностного слоя гильз, обработанных по предлагаемому и существующему техпроцессах, а также их изменение в процессе работы гильзы.

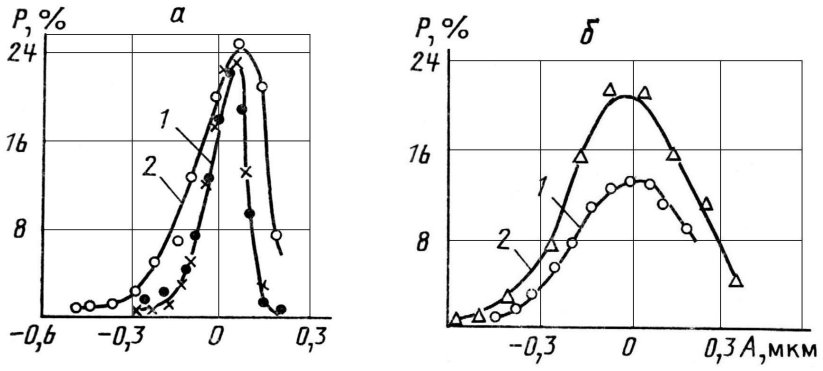
Таблица 2 – Параметры шероховатости и фрикционные показатели гильз ДВС (над чертой – данные после обработки, под чертой – после обкатки)

Вид обработки	R_a, мкм	R_{max}, мкм	R_z, мкм	R_ζ, мкм	$t_{r\zeta}$, %	t_ζ=10 %, %	S_m, мкм	HV_{To}, РПа	Износ, мкм	
									После 2х-часовой прира-ботки	После пробега 50000 км.
Протягивание	0,9	11	7,3	2,25	59	52	146	2,92	-	-
Растачивание + 2-х кратное хонингование	1,45 0,2	12,9 2,2	10,4 1,66	2,45 0,46	43 49	24 38	91,3 125,5	2,37 2,36	7,2	45
Протягивание + хонингование	0,8 0,18	7,5 1,8	5,39 1,05	1,51 0,22	66 63	60 58	160 158	2,8 2,76	5,5	33

Анализ этих данных показал, что операция протягивания значительно улучшает микрорельеф поверхностного слоя. Микрорельеф в этом случае представляет собой опорные площадки, чередующиеся с впадинами, служащими масляными резервуарами при эксплуатации. Чистовое хонингование практически не изменяет характер профиля, улучшая его за счет увеличения его опорной длинны. После эксплуатации высотные параметры шероховатости несколько уменьшились, а опорная длинна профиля и шаг по средней линии практически не изменились.

Микрорельеф поверхности, обработанной по существующему технологическому процессу, отличается от микрорельефа, полученного после обработки по новому техпроцессу. Особенно заметно отличие по значениям опорной длины профиля. В процессе эксплуатации значения высотных параметров также уменьшаются, однако в отличие от микрорельефа, полученного после деформирования параметры s_m и t_{r0} заметно увеличились. Следовательно, изменение параметров шероховатости, полученной по существующему технологическому процессу, в процессе эксплуатации более значительно, чем по новому. Это указывает на разницу в перестройке технологических шероховатостей, полученных после сравниваемых процессов при эксплуатации исследуемой детали.

Перестройку шероховатостей оценивали по методике, приведенной в работе [9]. Для этого сравнивали законы распределения ординат шероховатости после обработки и эксплуатации. Распределение ординат шероховатости поверхности обработанной протягиванием, подчиняется закону Вейбулла (рис. 3а).



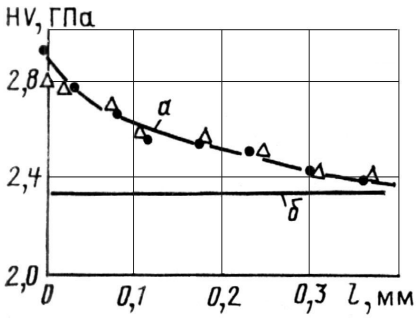
1- после обработки; 2- после эксплуатации; *а* – обработка по новому техпроцессу; *б* – по существующему.

Рисунок 3 – Законы распределения ординат шероховатости

Чистовое хонингование не изменяет этого закона распределения. После эксплуатации закон распределения ординат шероховатости также не изменяется, что свидетельствует о незначительной перестройке шероховатого слоя в процессе эксплуатации. Это также подтверждается анализом взаимных корреляционных функций профилей шероховатости, зафиксированных до и после эксплуатации. Значение коэффициента их взаимной корреляции больше нуля, т. е. в процессе эксплуатации двигателя на рабочей поверхности гильзы воспроизводится шероховатость близкая к технологической. Приведенные данные свидетельствуют о незначительной трансформации поверхностного слоя гильзы, обработанного с использованием ДПР, при эксплуатации, что создает условия, для снижения эксплуатационного износа.

Иная картина наблюдается при рассмотрении данных, полученных на гильзах, обработанных по существующему технологическому процессу. В этом случае распределение ординат шероховатости подчиняется закону нормального распределения (рис. 3б). В процессе эксплуатации вид закона распределения изменился, стал логарифмическим нормальным и приблизился к распределению Вейбулла. т. е. после перестройки, происшедшей при эксплуатации, разница в характере распределения ординат профилей, обработанных по рассматриваемым технологическим процессам, заметно уменьшилась. Анализ доверительных интервалов взаимных корреляционных функций профилей шероховатости до и после эксплуатации, что значение коэффициента взаимной корреляции равно 0, т. е. в процессе эксплуатации двигателя на рабочей поверхности гильзы формируется новый микрорельеф, полностью отличный от технологического.

Сравнение физико-механических характеристик поверхностей, обработанных по двум разным технологиям, показало существенное различие между ними (рис. 4).



а – новый техпроцесс обработки (О - после протягивания, Δ - после протягивания с последующим хонингованием); *б* – существующий техпроцесс.

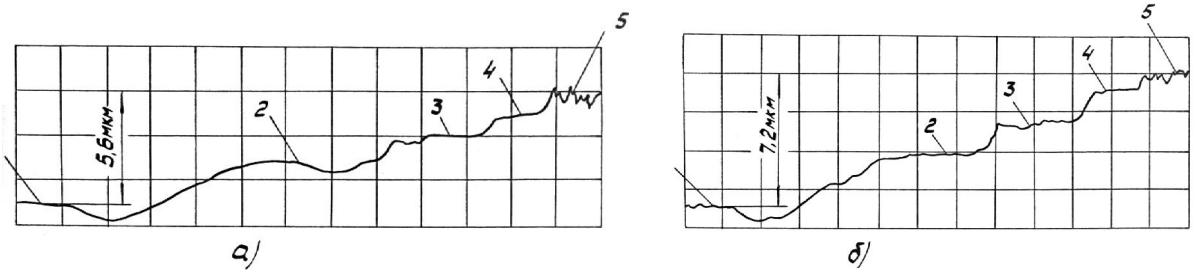
Рисунок 4 – Распределение твердости по толщине стенки гильзы двигателя ЗИЛ 130 при обработке

ДПР значительно (до 25%) упрочняет поверхностный слой материала гильзы, глубина упрочнения достигает порядка 0,3 мм, что надежно гарантирует наличие упрочненного материала в паре трения при эксплуатации. Твердость гильзы, обработанной по существующему техпроцессу, практически не меняется по толщине стенки, что свидетельствует об отсутствии заметного упрочнения.

Таким образом, основным преимуществом гильз, обработанных по технологии основанной на деформирующем протягивании, является наличие улучшенных геометрических и механических характеристик микрорельефа рабочей поверхности по сравнению с гильзами, обработанными по существующему технологическому процессу.

Сравнительный анализ затрат времени на каждой из операций существующего и нового техпроцессов показал повышение производительности не только на операции протягивания по сравнению с расточкой, но и существенное снижение затрат времени (до 1,5 раза) на операции хонингования. Это объясняется получением после операции протягивания более благоприятного микрорельефа, а также упрочнения поверхностного слоя, что улучшает обрабатываемость гильзы на последующей операции хонингования.

Для оценки эффективности разработанного техпроцесса обработки гильз рассмотрим результаты стендовых и ходовых испытаний двигателей оснащенных такими гильзами. Эти испытания выполнялись в условиях 3-го Киевского авторемонтного завода согласно инструкции сдаточных испытаний. Оценка эксплуатационных свойств гильз проводилась по линейному износу их рабочих поверхностей, зафиксированному на профилограммах с помощью профилографа-профилометра “Talysurf – 5”. Рассмотрим профилограммы линейного износа рабочих поверхностей двух гильз (рис. 5) после стендового испытания двигателя, одна из которых обработана по-новому (*а*), а другая по традиционному (*б*) техпроцессам.



1-5 место износа под соответствующим кольцом поршня; *а)* – обработка по новому техпроцессу; *б)* – по существующему.

Рисунок 5 – Линейный износ рабочей поверхности гильзы в зоне работы компрессионных колец после 2-х часовой приработки

Сравнение износа гильз, обработанных по новому техпроцессу и существующему, показало, что в первом случае величина износа гильз на максимально нагруженном участке на 25% ниже чем во втором. Более того, значительное уменьшение степени перестройки шероховатого слоя в процессе эксплуатации позволяет снизить время обкатки двигателя на стенде примерно на 25%.

Ходовые испытания наблюдаемых двигателей проводились в условиях 3-й Киевской автобазы Минпромстроя УССР. Износ гильз фиксировался через 50 тыс. км пробега автомобиля.

В табл. 2. представлены результаты замеров максимального износа гильз, обработанных по существующему и разработанному техпроцессам и прошедшими испытания на одном и том же двигателе. Износ измерялся при помощи индикаторной головки ИР5 на восьми равномерно расположенных по окружности участках рабочей полости гильзы. Как следует из табл. 2 величина износа гильз, обработанных по новому технологическому процессу примерно на 25% ниже величины износа гильз обработанных по существующему техпроцессу.

Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что максимальный износ рабочей поверхности гильз обработанных по новому технологическому процессу, после пробега автомобилей 50 тис. км. не превышает 0,06 мм, что значительно меньше глубины упрочненного слоя материала гильзы, полученного в результате ее деформирования. Поэтому следует ожидать дальнейшего увеличения разности в износостойкости гильз обработанных по предлагаемому и существующему техпроцессам, при дальнейшей их эксплуатации.

Эффективное использование ДПР в технологическом процессе обработке гильз из чугуна стало возможным благодаря решению проблемы обеспечения их геометрической точности. Оптимальным вариантом решения этой проблемы являлось использование схемы, обеспечивающей устранение условий, искажающих осесимметричность деформации, а именно: выполнение операций по обработке гильзы за одну установку на прямом и обратном ходе инструмента, обеспечение осесимметричного съема припуска режущим элементом, за счет фиксации его положения относительно оси гильзы двумя группами деформирующих элементов, расположенных впереди режущего элемента и за ним.

В свою очередь наличие режущего элемента, расположенного соосно деформирующим, обеспечило стабильный натяг на следующие за ним деформирующие элементы, что позволило минимизировать геометрические погрешности формы отверстия.

Таким образом:

- за счет решения задачи обеспечения геометрической точности отверстия гильз ДВС решена проблема обработки внутренней полости гильз из серых модифицированных чугунов деформирующим протягиванием;
- использование операции деформирующего протягивания позволяет увеличить производительность обработки отверстия в 4 раза, снизить затраты на инструмент в 3 раза, что приводит к снижению себестоимости восстановления гильзы в более чем в 4 раза;
- кроме того, использование разработанного технологического процесса обеспечивает получение поверхности с улучшенными механическими характеристиками и шероховатостью близкой к равновесной.

Список литературы

1. Немировский Я.Б., Чернявский А.В. Оценка предельных деформаций при деформирующем протягивании заготовок из чугуна //Повышение эффективности протягивания. – Рига: РПИ, 1990. – С. 103-108.
2. Немировский Я.Б., Чернявский А.В. Влияние деформирующего протягивания на качество деталей из чугуна. //Повышение эффективности протягивания. – Рига: РПИ, 1986. – С. 122-130.
3. Розенберг А.М., Розенберг О.А., Деледивка В.П. Твердосплавные режущие прошивки для обработки точных отверстий в деталях из чугуна. – УкрНИИНТИ, 1966. – 34с.
4. Немировский Я.Б. Исследование процесса деформирующего протягивания отверстий с целью оптимизации инструмента с групповым расположением рабочих элементов: Дис… канд. техн. наук; 05.03.01-К., 1981. – 281с.
5. Математическое моделирование процесса деформирующего протягивания // Е.А. Балаганская, Б.А. Голоденко, Я.Б. Немировский, Ю.А. Цеханов. – Воронеж: ВГТУ, 2001. – 194с.
6. Немировский Я.Б. Обеспечение геометрической точности изделий на основе изучения механики деформирующего протягивания // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», вып. 61, 2002. – С. 146-153.
7. Посвятенко Э.К. Механіка процесу різання пластичних металів після холодного деформаційного зміцнення // Резание и инструмент в технологических системах. – 1995-1996. – Вып. 50. – С.149-154.
8. Чернявский А.В. Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из чугуна деформирующим протягиванием: Автореф. дис… канд. техн. наук: 05.03.01/ИСМ АН УССР. – Киев, 1988. – 18 с.
9. Немировский Я.Б., Потемкин М.М., Чернявский А.В. Шероховатость поверхностей трения гильз ДВС, обработанных с использованием пластического деформирования // Трение и износ. – 1989. – Том 10, №3. – С. 446-451.

УДК 631.362.33

Б.І. Котов, проф., д-р техн. наук, С.П. Степаненко, мол. наук. співр.
Національний науковий центр "ІМЕСГ", с.м.т. Глеваха

Механіко-математична модель руху твердої частинки у віброзрідженному шарі зерна

Наведена математична модель, яка дозволяє проводити аналіз переміщення зернини у віброзрідженному шарі зерна,а також визначити вплив кінематичних режимів на час розшарування суміш. Викладені результати процесу сегрегації зернової суміші на основі експериментальних даних, для визначення часу розшарування суміші зерна з різною питомою вагою в залежності від різних показників: засміченості зернової маси, кінематичного режиму решета та повітряного режиму.
вібропневмосепаратор, механіко-математична модель, сегрегація, час розшарування, віброзрідженний шар

Розділення зернових і насіннєвих сумішей за густиною є найефективнішим способом підвищення якості насіння і продуктів переробки продовольчого зерна, так як його густина знаходиться у тісному кореляційному зв'язку з якісними показниками зерна (наприклад скловидність) [1]. Сортування зернової суміші за густиною здійснюється на машинах різного типу: вібраційних з коловими коливаннями, пневматичних і вібропневматичних із зворотно-поступальним рухом решіт. Але незважаючи на широке застосування вібропневматичних сепараторів потенційні можливості цього типу машин використовують недостатньо. Основною причиною такого стану є недостатня вивченість процесів сегрегації і самосортування сумішей в складному силовому полі, що являє собою сукупність гравітаційної, вібраційної, інерційної і аеродинамічних сил.

Наведені в літературі дослідження, обмежені в основному розглядом задач, переміщення матеріалу по вібруючій поверхні [2] при наявності повітряного потоку. В роботах [2,3] розглянуто процес занурення "особливої" частинки в сипке середовище, під дією сил зумовлених коловими коливаннями опорної горизонтальної поверхні. Сила опору руху частинки представлена сухим тертям. При цьому не враховують впливання діючих сил на змінення фізико-механічних властивостей віброзрідженного шару як середовище в якому рухається частинка, його розрихленності, густості, тощо. Сили опору є незалежними від стану середовища і дії інших сил. Все це приводить до однобокої оцінки впливу діючих сил і може привести до некоректних висновків.

Уточнення фізико-механічних уявлень і удосконалення математичної моделі переміщення частинок у вібропневмозрідженному шарі.

Для ефективної роботи вібропневмосепаратора необхідно щоб час розшарування не перевищував час переміщення шару до зони вивантаження, тобто $\tau_{заг} \le \tau_{переміщ.}$. Існуючі методи дозволяють визначити тільки швидкість переміщення частинки по опорній поверхні. Для теоретичного обґрунтування кінематичних і конструктивних параметрів робочої машини необхідно визначити, експозицію сепарації, тобто, час коли частинка досягне опорної поверхні решета.

Для теоретичного опису вібраційного розділення (поділу) сипких сумішей за щільністю, приймемо за основу таку фізичну модель шару зернового матеріалу, Шар зернового матеріалу отримує вібраційні переміщення в результаті взаємодії з опорною поверхнею, яка здійснює гармонічні коливання у вертикальній площині. Вібрації при наявності частинок з різними фізико-механічними властивостями приводять до того, що сипке середовище поводить себе, як система з в'язким опором (аналогічно рідині),

© Б.І. Котов, С.П. Степаненко. 2004

коефіцієнт в'язкості якої суттєво залежить від параметрів коливань [1,4]. Більш важкі одинокі частинки, ніж оточуючі їх частинки середовища однакового розміру занурюються в сипке середовище, а легкі частинки спливають. Причому час повного занурення важкої частинки дорівнює часу спливання легкої частинки на поверхню. Швидкість занурення визначається різницею питомої ваги частинки і середовища. В результаті дії вібрацій і повітряного потоку відбувається розрихлення шару – перехід до зрідженого стану і розшарування суміші. Час розшарування визначається часом за який важка частинка досягне поверхні решета, а легка спливе на поверхню шару зерна.

Для аналітичного дослідження руху частинки складемо диференційне рівняння руху частинки. Відповідно до рис.1 на частинку діють такі сили: сила тяжіння $\overline{P}$, виштовхуючи сила (сила Архімеда), $\overline{A}$; сила опору руху частинки $\overline{R_c}$; сила інерції коливального руху I; сила реакції повітряного потоку $\overline{R_n}$.

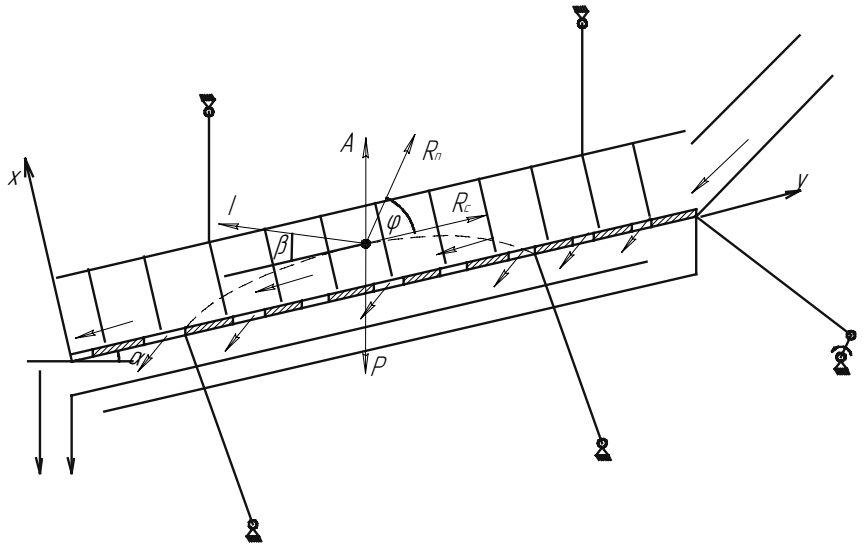


Рисунок 1 - Схема силової взаємодії частинки в процесі сепарації у випадку, коли площина коливання решета розташована під кутом α до горизонту

Відповідно до схеми силової взаємодії частинки, середовища і опорної поверхні рівняння руху частинки має вигляд:

$$m\overline{a} = \overline{P} + \overline{A} + I + \overline{R}_c + \overline{R}_n, \tag{1}$$

де m - маса частинки, кг;

$\overline{a}$ - абсолютне прискорення, м/с^2.

Оскільки маємо двомірну систему координат (УОХ) то диференційне рівняння (1) зводиться до системи двох диференційних рівнянь другого ступеню:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -\overline{P}_x + \overline{A}_x + \bar{I} - \overline{R}_{cx} + \overline{R}_{nx} \\ m\ddot{y} &= \overline{P}_y + \overline{A}_y + \bar{I}y - \overline{R}_{cy} + \overline{R}_{ny} \end{aligned}, \tag{2}$$

де з правого боку системи рівнянь (2) записані проекції відповідних сил на осі ОХ та ОУ.

Визначимо сили, які діють на частинку.

Сили тяжіння в гравітаційному полі:

$$P = mg \tag{3}$$

Виштовхуюча сила $A = \overline{V_r} \cdot \rho_0 \cdot g$, , $A = m_0 \cdot g$, (4)

де V_r - об'єм частинки, м^3;

ρ_0 - густина сипкого середовища, кг/м^3;

m_0 - маса сипкого середовища, в об'ємі, що дорівнює об'єму частинки, кг.

Для визначення, маси сипкого середовища необхідно визначити щільність сипкого середовища ρ_0. В роботах [2,3], під щільністю середовища розуміють щільність самих частинок, із яких складається шар зерна (постіль). Але ця величина є сталою і не залежить від зовнішніх збурень (дія вібрацій, повітря тощо), сила А не буде відображати реальну картину фізичного процесу впливання вібрацій на переміщення частинки в шарі.

Фізичний стан середовища, що визначається ступенем рихлення шару зерна і в значній мірі, залежить від параметрів вібрацій [4], і швидкості повітря, що подається в шар[5]. Ступінь розрихленності шару зерна характеризується ступенем збільшення його об'єму, а оскільки шар зерна на опорній поверхні обмежений з боків то при наявності збурюючих дій змінюється його висота.

Таким чином, ступінь розрихленості шару може характеризуватись співвідношенням висоти шару у нерухомому і зрідженому стані $h/h_0 = \delta\left(j \cdot V_n\right)$, відповідно порозністю яка може бути представлена залежністю

$$\varepsilon = 1 - \frac{1-\varepsilon_0}{h/h_0}, \tag{5}$$

де ε_0 - порозність шару в статичному стані;

h/h_0 - ступінь розрихленості шару (розширення шару).

Якщо за густину сипкого середовища прийняти величину пропорційну насипній питомій вазі шару, яка визначається величиною порозності , то беручи до уваги співвідношення:

$$\rho_n = \rho_T(1-\varepsilon), \tag{6}$$

де ρ_T - густина матеріалу частинки, кг/м^3.

Виштовхуючу силу можна представити так:

$$A = V_r \cdot \rho_T \cdot (1-\varepsilon) \cdot g \cdot K, \tag{7}$$

де *K*- коефіцієнт, що враховує властивості шару даної зернової суміші і динамічний вплив взаємодії частинок в шарі (форму частинки і її орієнтацію).

Величина порозності визначає стан сипкого середовища, який може змінювати не тільки об'єм, але й проникність повітря крізь шар зерна, тому зміненням цієї величини можна врахувати дію вібрацій і повітряного потоку на шар зерна, в цілому і частинку окремо. Відповідно до [6] залежність порозності від вібрацій повітряного потоку можна представити емпіричною залежністю у вигляді:

$$\varepsilon = 1 - A_0 \cdot V_n \cdot \frac{a + (j^2 - g)^{-2}}{b + (j^2 - g)^{-2}}, \tag{8}$$

де V_n - швидкість повітря, що подається в шар, м/с;

j - прискорення вібрацій, м/с^2;

A_0, а, в – емпіричні коефіцієнти.

Силу реакції повітряного потоку визначимо, як силу лобового опору частинки у формі кулі за законом Ньютона:

$$R_n = f\left(R_e\right) \cdot F_m \cdot \rho_n \cdot \frac{V_\phi}{2}, \tag{9}$$

де $f\left(R_e\right)$- коефіцієнт аеродинамічного опору, який є функцією порозності;

ρ_n - густина повітря, кг/м^3;

F_m - площа перерізу, м^2;

V_ϕ - швидкість фільтрації повітря, м/с.

Коефіцієнт опору в виразі (9) можна представити, як функцію порозності за умов стислого руху [7]:

$$f(R_e) = \frac{13}{\sqrt{d_e \cdot \varepsilon^{2.29}}}. \tag{10}$$

Вібраційна сила інерції (сукупна, рівнодіюча).

$$\bar{I} = (m - m_0) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t. \tag{11}$$

Силу опору $R_{x,y}$ переміщенню частинки у зрідженому шарі зерна у першому наближенні можна визначити, як силу, що обумовлена співударянням та тертям між частинками і за аналогією до [5] можна визначити так:

$$R = K \cdot (1 - \varepsilon)^{0.33} \cdot \frac{V}{d_e}, \tag{12}$$

де К – узагальнений коефіцієнт опору;

d_e - еквівалентний діаметр частинки, м;

V - швидкість руху частинки, м/с.

Враховуючи, що сила опору має напрямок протилежний швидкості руху, тому силу опору R_C визначимо так:

$$\begin{aligned} R_{cx} &= R_x \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \\ R_{cy} &= R_y \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \end{aligned}, \tag{13}$$

де R_{CX} - сила опору у напрямку Х, R_{CY} - сила опору у напрямку У.

Тоді із урахуванням, усіх діючих сил і вагомих факторів рух частинки, у вібро-пневмозрідженному середовищі, може бути описано диференціальними рівняннями другого порядку у вигляді:

$$\begin{aligned} &m_1 \ddot{x} = -m_0 (\Delta - 1) \cdot g \cdot \cos\alpha + V_r \cdot \rho_T \cdot (1 - \varepsilon) \cdot g \cdot K \cdot \cos\alpha + m_0 \cdot (\Delta - 1) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \cdot \\ &\cdot \sin\beta - R_x \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} + f(R_e) \cdot F_m \cdot \rho_n \cdot \frac{V_\phi}{2} \cdot \sin\varphi, \\ &m_1 \ddot{y} = -m_0 (\Delta - 1) \cdot g \cdot \sin\alpha + V_r \cdot \rho_T \cdot (1 - \varepsilon) \cdot g \cdot K \cdot \sin\alpha - m_0 \cdot (\Delta - 1) \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \cdot \\ &\cdot \cos\beta - R_y \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} + f(R_e) \cdot F_m \cdot \rho_n \cdot \frac{V_\phi}{2} \cdot \cos\varphi, \end{aligned} \tag{14}$$

де $\Delta = \frac{\rho_ч}{\rho_0}$.

Отримана система рівнянь і є шуканою математичною моделлю руху частинки у зрідженому зерновому шарі, яке відрізняється від відомих [2,3,5], тим, що всі члени правої частини рівняння враховують змінні параметри середовища, в залежності від режимів впливання, так як в усіх складових присутні залежності виду $\varepsilon = f(A \cdot \omega^2; V_n)$.

Приймаючі відповідно до (13) опір окремої частинки в сипкому (віброзрідженому) середовищі зростає пропорційно першому ступеню швидкості:

$$R = V \cdot K. \tag{15}$$

Рух частинки у віброзрідженому шарі, що знаходиться на похилій поверхні яка здійснює прямолінійні коливання під кутом β, можна визначити розв'язанням двох лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} m_1\ddot{x} + K\dot{x} &= -m_0(\Delta-1)\cdot g\cdot\cos\alpha + V_r\cdot\rho_T\cdot(1-\varepsilon)\cdot g\cdot K\cdot\cos\alpha + m_0\cdot(\Delta-1)\cdot A\cdot\omega^2\cdot \\ &\cdot\sin(\omega t)\cdot\sin\beta + f(R_e)\cdot F_m\cdot\rho_n\cdot\frac{V_\phi}{2}\cdot\sin\varphi \\ m_1\ddot{y} + K\dot{y} &= -m_0(\Delta-1)\cdot g\cdot\sin\alpha + V_r\cdot\rho_T\cdot(1-\varepsilon)\cdot g\cdot K\cdot\sin\alpha - m_0\cdot(\Delta-1)\cdot A\cdot\omega^2\cdot \\ &\cdot\sin(\omega t)\cdot\cos\beta + f(R_e)\cdot F_m\cdot\rho_n\cdot\frac{V_\phi}{2}\cdot\cos\varphi \end{aligned} \tag{16}$$

Розв'язуючі рівняння (16) при початкових та граничних умовах: $t=0, \dot{X}=0; \dot{Z}=0; R_n=0; m_1 \succ m_2$ визначимо переміщення частинки вздовж поверхні і нормально до неї:

$$x = \frac{a_1\omega - \dot{x}_0}{A_0}\left[e^{-A_0 t} - 1\right] - B_1 - a_1\sin\omega t - b_1\cos\omega t\,, \tag{17}$$

$$y = \frac{a_2\omega - \dot{z}_0}{A_0}\left[e^{-A_0 t} - 1\right] - B_2 - a_2\sin\omega t - b_2\cos\omega t\,, \tag{18}$$

$$B_1 = \frac{m_0(\Delta-1)}{m_1}\left[A\omega^2\cos\beta + \frac{m_1\cdot g + R_{nx}}{K}\sin\alpha\right];$$

де

$$B_2 = \frac{m_0\cdot(\Delta-1)}{m_1}\left[A\omega^2\sin\beta + \frac{m_1\cdot g + R_{ny}}{K}\cos\alpha\right];$$

$$a_1 = \frac{B_1}{\omega^2 - A_0};\ a_2 = \frac{B_2}{\omega^2 - A_0};\ b_{1,2} = \frac{A_0\cdot B_{1,2}}{\omega\cdot(\omega^2 + A_0^2)};\ A_0 = \frac{K}{m_1}$$

Диференціюючи рівняння (17) і (18) знайдемо складові швидкості руху частинки вздовж поверхні та нормально до неї

$$V_x = (V_{x0} - a_1\cdot\omega)e^{-A_0 t} + a_1\omega\cos\omega t - B_1\cdot\omega\sin\omega t\,, \tag{19}$$

$$V_z = (V_{z0} - a_2\cdot\omega)e^{-A_0 t} + a_2\omega\cos t - B_2\cdot\omega\sin\omega t\,. \tag{20}$$

За допомогою рівнянь (17) – (20) можна розраховувати траєкторію руху частинки і визначити складові її швидкості у будь-якій точці шару.

Виходячи з наведених механіко – фізичних посилань розроблена математична модель, яка дозволяє проводити аналіз переміщення зернини у віброзрідженному шарі зерна, визначити вплив кінематичних режимів на час розшарування.

Список літератури

1. Бутко В.П. Исследование плотности зерна пшеницы как перспективного показателя технологических свойств. Афтореф. дис. канд. техн. наук. М.– 1973. – 24с.
2. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение – М.: Наука, 1964. – 440с.
3. Блехман И.И., Гортинский В.В., Птушкина Г.Е. Движение частицы в колеблющейся среде при наличии сопротивления типа сухого трения // Известия АНСССР с. "Механика и машиностроение, 1963, №4.– С.32-38.
4. Баркан Д.Д. Виброметод в строительстве. М.: Госстройиздат, 1959.– 361с.
5. В.М. Цециновский, Г.Е. Птушкина. Технологическое оборудование зерноперерабатывающих предприятий. М.: "Колос". – 1976. – 368с.
6. Фрегер Ю.Г. Гидравлическое сопротивление зернового слоя на вибрирующей поверхности // Труды ВИСХОМ. М., 1964, вып. 44, С.33-45.
7. Бабуха Г.Л., Рабинович М.И. Механика и теплообмен потоков дисперсной газовзвешенности. К.: "Наукова думка " 1969. – 216с.

УДК 631.331

В.В. Амосов
Кіровоградський національний технічний університет

Аналіз процесу відокремлення насінин від присмоктувальних отворів вакуумного пневмомеханічного висівного апарата

Теоретично визначено вплив геометричних параметрів присмоктувальних отворів циліндричної, конічної та тороїдальної форми на рівномірність розподілу насінин по довжині рядка.
вакуумний пневмомеханічний висівний апарат, математична модель, рівномірність розподілу насінин

Рівномірність розподілу насінин по довжині рядка є головним показником якості роботи вакуумного пневмомеханічного висівного апарата (ВПМВА) з вертикальним диском. Від нього в значній мірі залежить урожайність. Тому підвищення рівномірності розподілу насінин просапних культур по довжині рядка – важлива наукова та практична задача

Параметри присмоктувальних отворів висівного диска ВПМВА впливають на процеси захвату насінин, скидання зайвих і відокремлення насінин від висівного диска. С. І. Шмат і В. С. Сотніков [1] та Ю. М. Корнєв [2] рекомендують з метою покращення заповнення присмоктувальних отворів насінинами замість традиційної циліндричної форми поверхні використовувати конічну. Запропоновано також використати отвори з тороїдальною поверхнею [3]. Але зміна форми поверхні присмоктувального отвору впливає не тільки на процес заповнення присмоктувального отвору насінинами, але і на процес їх відокремлення від поверхні отворів при падінні на дно борозни. Теоретичним дослідженням цього процесу ніхто не займався.

Тому *метою* даної роботи є визначення впливу форми поверхні та геометричних параметрів присмоктувальних отворів на рівномірність розподілу насінин по довжині рядка.

Розглянемо процес відокремлення насінини від гострої кромки циліндричної поверхні присмоктувального отвору (поверхня отвору має форму циліндра). На неї діють такі сили (рис. 1): G -сила тяжіння; $F_{цб}$ - відцентрова сила; N -нормальна складова реакції поверхні; $F_{тр}$ - сила тертя між насініною та поверхнею отвору.

Знайдемо проекції сил, які діють на насінину, на осі системи координат *Wxyz*, пов'язаної з висівним диском

$$\left.\begin{array}{ll} \sum Y_i = m\ddot{y} & N\cdot\cos\tau - F_{тр}\cdot\sin\tau = m\ddot{y} \\ \sum Z_i = m\ddot{z} & F_{тр}\cdot\cos\tau + N\cdot\sin\tau - G - F_{цб}\cdot\cos\mu = m\ddot{z} \\ \sum X_i = m\ddot{x} & F_{цб}\cdot\sin\mu = m\ddot{x}, \end{array}\right\} \qquad (1)$$

де τ – кут між центром насінини і горизонтальною віссю;

m - маса однієї насінини;

μ – кут між відцентровою силою і вертикальною віссю.

© В.В. Амосов. 2004

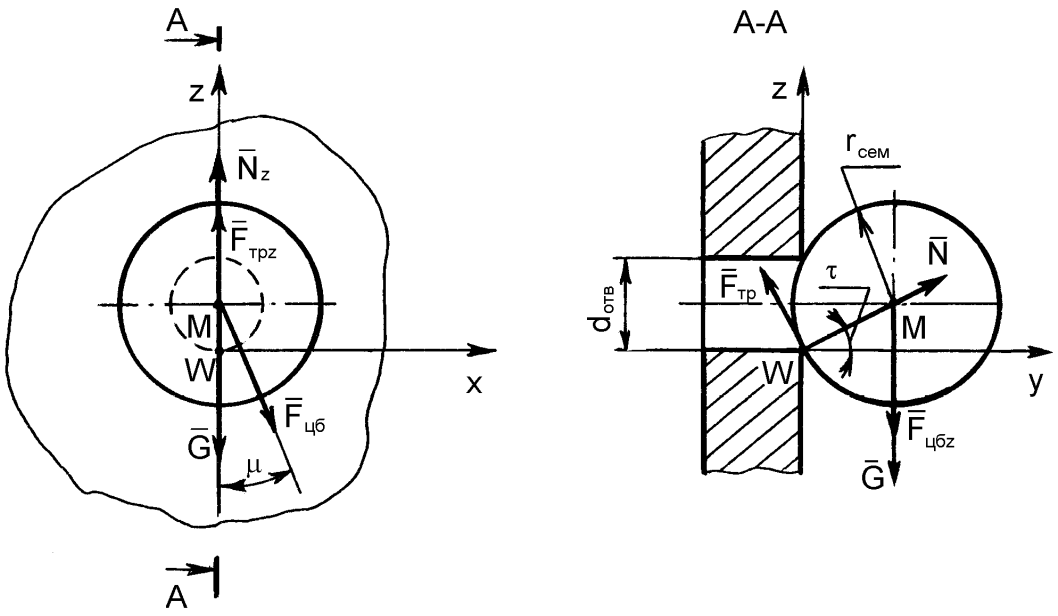


Рисунок 1 – Схема сил, які діють на насінину при відокремленні від гострої кромки присмоктувального отвору

Запишемо суму моментів відносно осей *Wx* і *Wy*

$$\left.\begin{aligned}(G + F_{цб} \cdot \cos\mu) r_{сем} \cdot \cos\tau = J_x \ddot{\tau} \\ F_{цб} \cdot r_{сем} \cdot \sin\mu = J_y \xi_y\end{aligned}\right\}, \tag{2}$$

де J_x, J_y – моменти інерції насінини відносно осей *Wx* та *Wy*.

Аналіз чисельних значень показав, що в межах робочих режимів $F_{цб} = m\omega^2 R_0 << mg$.

Тому відцентровою силою можна знехтувати і вважати, що рух насінини відбувається у площині *Wxy*. Допускаючи, що проковзування у т. *W* відсутнє, після деяких перетворень отримаємо диференційне рівняння руху насінини

$$\ddot{\tau} = -\frac{5g}{7r_{сем}} \cdot \cos\tau, \tag{3}$$

де *g* – прискорення сили тяжіння.

Інтегрування рівняння (3) з урахуванням початкових умов дає

$$(\dot{\tau})^2 = \frac{10g}{7r_{сем}}(\nu - \sin\tau),$$

де ν – відношення діаметрів отвору і насінини.

Визначимо кут $\tau_{отд}$, при якому насінина відокремиться від кромки присмоктувального отвору, враховуючи, що у момент відокремлення $N = 0$.

$$\tau_{отд} = \arcsin(2\nu/3).$$

Визначимо час руху насінини від вихідного положення до моменту відокремлення її від кромки

$$t_г = \int_{\tau_0}^{\tau_{отд}} \frac{d\tau}{\sqrt{\frac{10g}{7r_{сем}}(\nu - \sin\tau)}}, \tag{4}$$

де τ_0 – початковий кут руху насінини.

Інтеграл (4) не належить до табличних, тому визначимо його чисельним методом з використанням програми MathCAD 2000.

Визначимо швидкість центру мас насінини в момент відокремлення її від кромки присмоктувального отвору

$$\vartheta_{отд} = \sqrt{10 g r_{отв} / 21}.$$

Розглянемо процес відокремлення насінини від конічної поверхні присмоктувального отвору (рис. 2).

На неї діють ті ж сили, що і на насінину, яка відокремлюється від гострої кромки присмоктувального отвору. Розташовуємо осі системи координат *Wxyz* як показано на рис. 2. Рівняння руху насінини можна записати в такому вигляді:

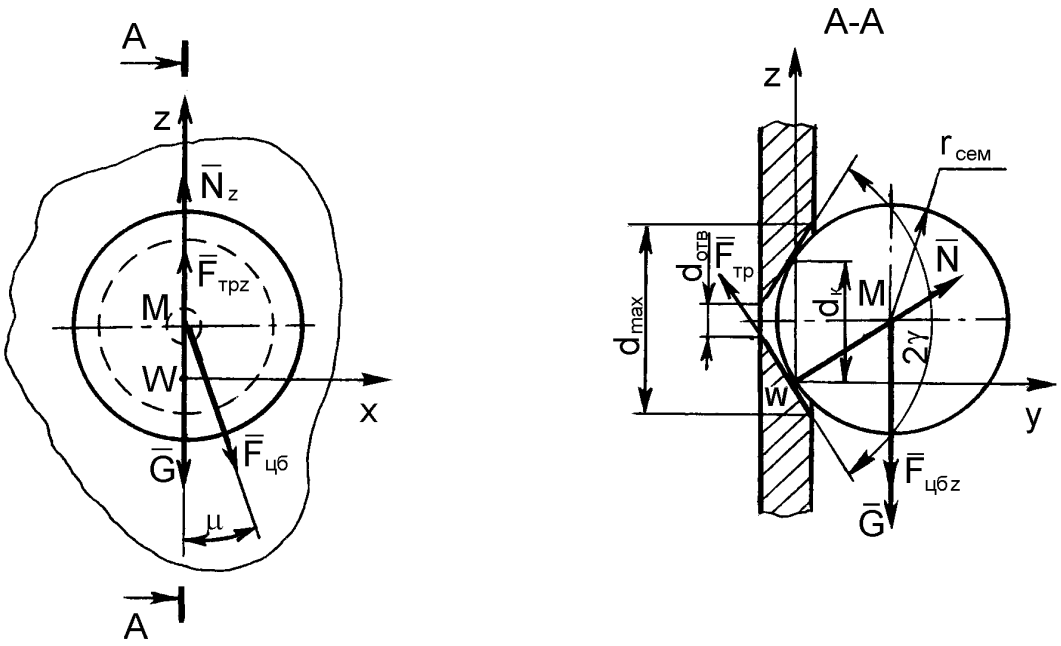


Рисунок 2 – Схема сил, які діють на насінину при відокремленні від конічної поверхні присмоктувального отвору

$$\left.\begin{aligned} &F_{цб}\sin\mu = m\ddot{x};\\ &G\sin\gamma + F_{цб}\cos\mu\sin\gamma - F_{тр} = m\ddot{y};\\ &N - F_{цб}\cos\mu\cos\gamma - G = m\ddot{z};\\ &\left(F_{цб}\cos\mu + G\right)r_{сем}\sin\gamma = J_x\ddot{\xi}_x;\\ &F_{цб}r_к\sin\mu = J_y\ddot{\xi}_y. \end{aligned}\right\}, \qquad (5)$$

де γ – кут між твірною конічної поверхні та її віссю;

$r_к$ - радіус кола контакту насінини з конічною поверхнею присмоктувального отвору.

Як і для циліндричної поверхні, відцентровою силою можна знехтувати. Тоді розгляд руху сферичної насінини можна замінити вивченням руху її перерізу площиною *Wyz*. Рівняння руху насінини можливо записати у вигляді

$$\left.\begin{aligned} &mg\sin\gamma - N\cdot\kappa_{тр} = m\ddot{y};\\ &N - mg\cos\gamma = m\ddot{z};\\ &mgr_{сем}\cdot\sin\gamma = J_x\ddot{\xi}_x. \end{aligned}\right\}, \qquad (6)$$

де $k_{тр}$ – коефіцієнт тертя між насіниною та поверхнею отвору.

Аналіз розв'язку аналогічної системи диференційних рівнянь руху проведено П.М.Заїкою ([4], с. 160-177) . Ним визначено, що насінина буде котитись при куті нахилу твірної конуса, для якого виконується нерівність

$$arctgk_{тр} < \gamma < \gamma_{\max},$$

де $\gamma_{\max}$ - максимальний кут нахилу твірної, при якому тіло буде котитись.

Для кулі [4]

$$\gamma_{\max} = arctg\left(3{,}5k_{тр}\right).$$

Швидкість руху центра мас насінини в кінці відрізка довжиною $l_к$ при нульовій початковій швидкості

$$\vartheta'_{ко} = \sqrt{2gl_к \varepsilon \sin\gamma},$$

де ε - параметр, значення якого для однорідної кулі ε=5/7.

Час руху насінини до моменту відокремлення

$$t_{ко} = \sqrt{\frac{d_{\max} - d_{сем}\cos\gamma}{g\varepsilon\sin^2\gamma}}.$$

Таким чином, час руху насінини по конічній поверхні присмоктувального отвору можна регулювати, змінюючи його максимальний розмір $d_{\max}$. Якщо

$$d_{\max} = d_{сем}\cos\gamma,$$

то $t_{ко} = 0$. У цьому випадку можна розглядати процес як відокремлення насінини від гострої кромки та використовувати для його аналізу залежності, виведені для циліндричної поверхні.

Розглянемо процес відокремлення насінини від поверхні присмоктувального отвору, який має плавне розширення у формі частини тора (рис.3).

На неї діють ті ж сили, що і при відокремленні насінини від гострої кромки та конічної поверхні присмоктувального отвору.

Введемо полярну систему координат, пов'язану з висівним диском. Система рівнянь, які описують кочення насінини, має вигляд

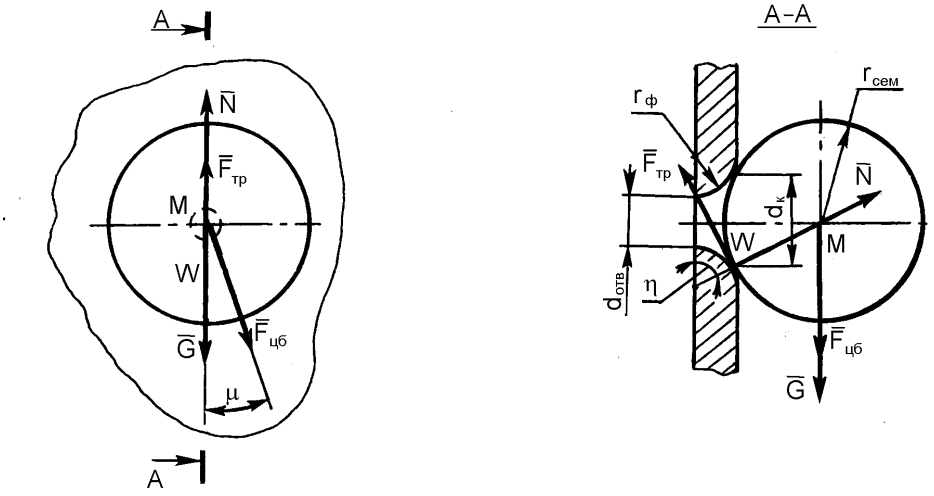


Рисунок 3 – Схема сил, які діють на насінину при відокремленні від тороїдальної поверхні присмоктувального отвору

$$\left.\begin{aligned} m\left(r_{сем}+r_{ф}\right)\ddot{\eta}&=\left(G+F_{цб}\cos\mu\right)\sin\eta-F_{тр};\\ -m\left(r_{сем}+r_{ф}\right)\dot{\eta}^{2}&=N-\left(G+F_{цб}\cos\mu\right)\cos\eta;\\ J\ddot{\xi}&=F_{тр}r_{сем,}\end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

де η- кут повороту насінини відносно вертикальної осі, пов'язаної з висівним диском;

ξ- кут повороту насінини відносно власного центру мас при її перекочуванні по поверхні.

Нехтуючи відцентровою силою, отримаємо

$$\left.\begin{aligned} m\left(r_{сем}+r_{ф}\right)\ddot{\eta}&=G\sin\eta-F_{тр};\\ -m\left(r_{сем}+r_{ф}\right)\dot{\eta}^{2}&=N-G\cos\eta;\\ J\ddot{\xi}&=F_{тр}r_{сем,}\end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

Аналіз розв'язку аналогічної системи диференційних рівнянь (для циліндричної частки) проведенно П.М.Заїкою ([4], с.445-450). Ним визначено, що насінина буде котитися без ковзання до кута

$$\eta_{к}=\arccos\frac{2\varepsilon k_{тр}}{\sqrt{\left(1+2\varepsilon\right)^{2}k_{тр}^{2}+\left(1-\varepsilon\right)^{2}}}-arctg\frac{1-\varepsilon}{k_{тр}\left(1+2\varepsilon\right)}.$$

Початковий кут, з якого починає рухатись насінина

$$\eta_{0}=\arccos\frac{r_{отв}+r_{ф}}{r_{сем}+r_{ф}}.$$

Кутова швидкість руху насінини при куті η

$$\dot{\eta}=\sqrt{\frac{\varepsilon\left(\cos\eta_{0}-\cos\eta\right)g}{r_{сем}+r_{ф}}}.$$

Кут відокремлення насінини від поверхні присмоктувального отвору [4]

$$\eta_{отд}=\arccos\left(\frac{2\varepsilon}{1+2\varepsilon}\cos\eta_{0}\right).$$

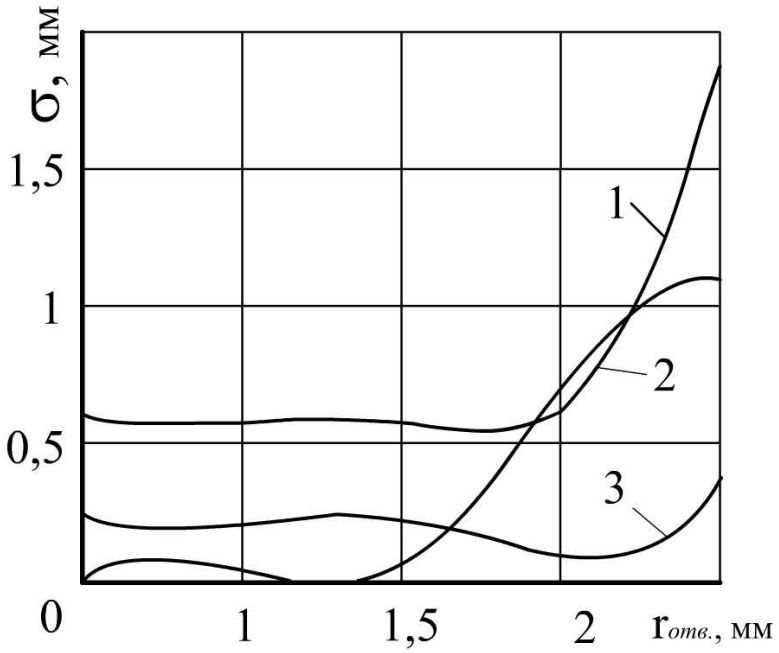
Час кочення насінини по поверхні отвору (від початку руху до початку ковзання)

$$t_{к}=\int_{\eta_{0}}^{\eta_{к}}\frac{d\eta}{\sqrt{\frac{2\varepsilon g\ \left(\cos\eta_{0}-\cos\eta\right)}{r_{сем}+r_{ф}}}}.$$

На основі виведених залежностей складено математичну модель, яка імітує процес відокремлення насінин від присмоктувальних отворів висівного диска ВПМВА, які мають циліндричну, конічну та тороїдальну поверхню, та їх падіння на дно борозни. Математичну модель реалізовано у програмі, складеній у системі Mathcad 2000. У результаті моделювання отримано вектори інтервалів між насінинами, розміри яких розподілено за усіченим нормальним законом, на дні борозни. Обробка кожного вектора методами математичної статистики дозволила визначити середнє вибіркове значення інтервалу між насінинами та середньоквадратичне відхилення інтервалів. Останній показник обрано критерієм рівномірності розподілу насінин по довжині рядка. Багаторазове повторення математичного експерименту при різних параметрах присмоктувальних отворів та насінин дозволило отримати залежності рівномірності розподілу від середнього радіуса насінин (рис. 4), від радіуса присмоктувального

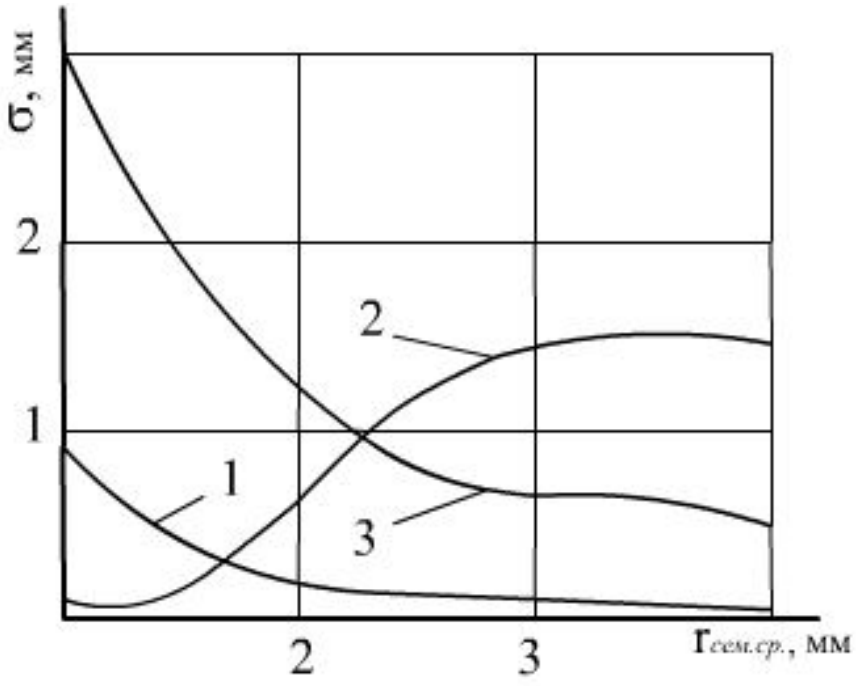
отвору (рис. 5), від кута конусної поверхні присмоктувального отвору (рис. 6). Їх аналіз дає можливість зробити наступні висновки.

Рівномірність розподілу насінин по довжині рядка погіршується зі зменшенням середнього діаметра насінин та збільшенням радіуса присмоктувального отвору. Найменшу чутливість до зміни радіуса насінини має отвір з циліндричною поверхнею.



1 – гостра кромка; 2 – конічна поверхня; 3 – тороїдальна поверхня.

Рисунок 4 – Вплив середнього радіуса насінини на рівномірність розподілу насінин у рядку (ω=10 $с^{-1}$; $r_{отв}$=0,5 мм; d_{max}=2,8 мм; $r_ф$=0,9 мм; $K_{тр}$=0,4)

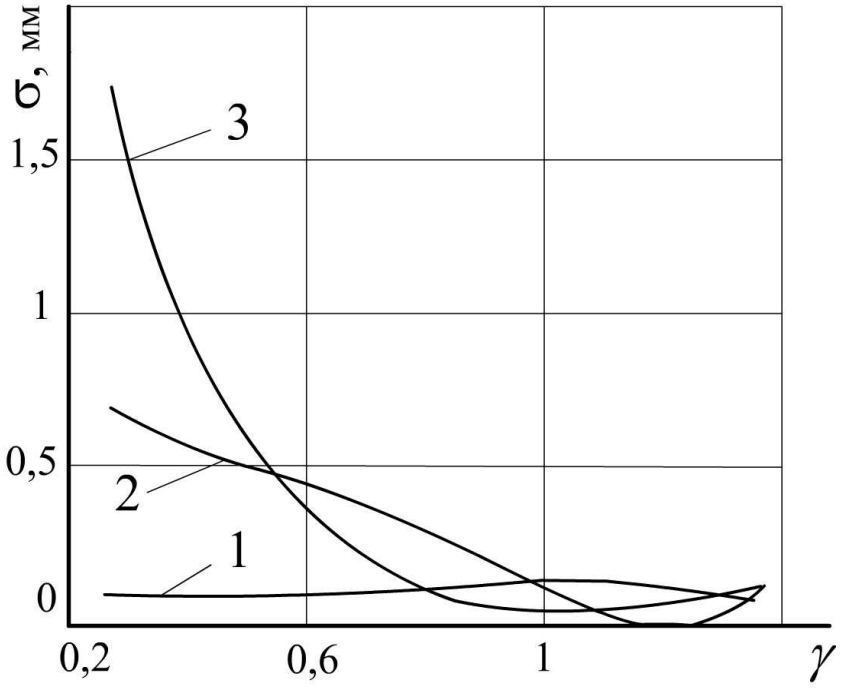


1 – $r_{сем\ ср}$ = 6 мм; σ_r= 1,2 мм; 2 – $r_{сем\ ср}$ = 5 мм; σ_r = 1 мм; 3 – $r_{сем\ ср}$ = 7 мм; σ_r = 1,4 мм.

Рисунок 5 – Вплив радіуса присмоктувального отвору на рівномірність розподілу насінин у рядку при відокремленні від гострої кромки (ω=10 $с^{-1}$)

При конічній поверхні присмоктувального отвору найвищу рівномірність розподілу насінин по довжині рядка можливо досягнути при куті конуса $2\gamma=2\pi/3$ та максимальному діаметрі $d_{max}=(1,7–2,0)\ r_{сем}$.

Найвищу рівномірність розподілу насінин по довжині рядка забезпечує присмоктувальний отвір з циліндричною формою поверхні, причому вона покращується зі зменшенням співвідношення $d_{отв}/d_{нас}$.



1 – $d_{так}$ = 3 мм; 2 – d_{max} = 5 мм; 3 – d_{max} = 7 мм.

Рисунок 6 – Вплив кута конусної поверхні присмоктувального отвору на рівномірність розподілу насінин у рядку (ω=10 $с^{-1}$; $r_{отв}$ = 1 мм; $r_{сем\ ср}$ = 3 мм; σ_r= 0,6 мм)

Список літератури

1. Шмат С.И., Сотников В.С. Повышение производительности пневматического высевающего аппарата // Конструирование и технология пр-ва с.-х. машин: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 1989.– Вып.19. – С.68–71.
2. Корнєв Ю. Дослідження заповнення присмоктувальних отворів пневматичного висівного апарата // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. збірник.– Кіровоград: КДТУ, 1999.–Вип.27–С.114–119.
3. Пат. 46278 Україна, МПК A01C7/04. Пневматичний висівний апарат / В.В. Амосов, Г.Б. Філімоніхін, А.І. Бойко (Україна)–№2001063720; Заявл. 1.06.2001; Опубл. 16.08.2004, Бюл. №8.– 4с.
4. Заика П.М. Избранные задачи земледельческой механики: Практ. пособие.–К.: Изд-во УСХА, 1992.–512 с.

УДК 621.869

О.В. Лізунков, канд. техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет,
В.О. Шевченко
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Методика вибору енергетичних модулів до сільськогосподарських машин

Розглянуто питання вибору необхідної кількості енергетичних модулів для двомодульних сільськогосподарських машин машин з точки зору забезпечення їх готовності до виконання теримінових робіт.
модуль, експлуатація, сільськогосподарські машини

Одним із перспективних шляхів подальшого удосконалення сільськогосподарської техніки для фермерських господарств та невеликих агрофірм є використання машин модульного типу. Прикладом такого типу агрегатів може служити розроблена на кафедрі будівельних та дорожніх машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету малогабаритна машина на базі комплектуючих колісного самохідного шасі Т-16МГ. Машина складається з двох модулів: енергетичного і технологічного. Обидва модулі одноосьові. Енергетичний модуль містить у собі двигун, трансмісію, ходове обладнання, систему керування, кабіну оператора. Технологічний модуль призначений для виконання визначеного типу робіт і складається з металоконструкції, ходового обладнання, робочого обладнання й окремих елементів системи керування.

Конструктивна концепція двомодульної машини припускає періодичну зміну технологічних модулів при постійному енергетичному модулі. Це дозволяє більш ефективно використовувати машини, обладнані робочими органами для сезонного використання, або для виконання великої кількості різноманітних робіт невеликого обсягу.

Експлуатація двомодульних машин приводить до формування своєрідного режиму навантаження окремих її елементів:

- технологічні модулі під час експлуатації сприймають вплив характерних, властивих тільки їм, режимів зовнішнього навантаження, або знаходяться на зберіганні;

- енергетичні модулі під час експлуатації сприймають різні режими зовнішнього навантаження, що відповідають типу технологічного модуля, що приєднаний. Зміна режимів навантаження відбувається довільно, у залежності від черговості замовлень, що надходять, на виконання робіт.

У практиці експлуатації техніки, зокрема в сільському господарстві, почасту виникають ситуації, коли виконання заданих обсягів робіт є обмеженим за часом. У цьому випадку стає актуальною проблема вибору мінімально необхідної кількості модулів, що повинна мати організація.

Мінімальна кількість технологічних модулів даного типу визначається такою залежністю:

© О.В. Лізунков, В.О. Шевченко. 2004

$$n_{TM\,i} = \frac{V_i}{n_i t_i}\ , \tag{1}$$

де V_i - середньостатистичний обсяг *i-го* виду робіт;

$П_i$ - експлуатаційна продуктивність технологічного модуля відповідної конструктивної конфігурації;

t_i - резерв часу, протягом якого повинна бути виконана робота *i-го* виду.

На відміну від технологічних модулів, енергетичні постійно працюють, або знаходяться в ремонті, або технічному обслуговуванні. Це значить, що в заданий момент часу не всі 100 % енергетичних модулів зможуть приступити до *i-го* виду роботи, а тільки їхня частина. У загальному випадку, для забезпечення виконання даного обсягу робіт у жорстко встановлений термін необхідно мати кількість енергетичних модулів, що перевищує число технологічних.

Задачу визначення потреби енергетичних модулів в остаточному підсумку можна сформулювати в такий спосіб: скільки необхідно мати таких агрегатів для того, щоб гарантованно виконати роботу обсягом V_i у заданий інтервал часу t_i? Очевидно, для рішення поставленої задачі необхідно залучити апарат теорії надійності механічних систем.

Розглянемо спрощену модель функціонування малого (за обсягомі виконуваних робіт) господарства. Будемо вважати, що у випадку надходження замовлення на термінове виконання роботи всі інші робочі операції припиняються і машини знімаються для виконання даного термінового замовлення.

Мінімально необхідна кількість енергетичних модулів може бути визначена за залежністю:

$$m = \frac{V_i}{n_i t_i}. \tag{2}$$

Оскільки завжди існує імовірність того, що частина енергетичних модулів у даний момент часу будуть перебувати в непрацездатному стані, то, мабуть, їхня кількість в організації повинна бути більшою, ніж потрібно для виконання найбільш ймовірної термінової роботи:

$$n \geq m. \tag{3}$$

Призначимо нормативний рівень ймовірності $[p]$, що визначає ступінь упевненості того, що в будь-який момент часу господарство зможе надати не менш m працездатних машин. У цьому випадку для реального парку машин повинна виконуватися умова:

$$p_{m,n}(t) \geq [p], \tag{4}$$

де $p_{m,n}(t)$ - імовірність того, що m з n енергетичних модулів, що перебувають в господарстві, у даний момент часу будуть працездатні.

Розрахункова задача ускладнюється через те, що всі n модульних агрегатів можуть працювати в різних умовах, обумовлених, принаймі, типом приєднаного технологічного обладнання. Це значить, що через розходження зовнішніх режимів навантаження кожний із них буде мати свій рівень працездатності. Позначимо через $K_j(t)$ ймовірність перебування в працездатному стані *j-го* енергетичного модуля. З огляду на те, що для всіх машин ці ймовірності є незалежними величинами, у цілому для парку з n енергетичних агрегатів справедлива рівність:

$$p_{m,n}(t) = K_1(t)K_2(t)\dots K_m(t)[1-K_{m+1}(t)]\dots[1-K_n(t)] + \\ + K_1(t)[1-K_2(t)]K_3(t)\dots[1-K_{n-1}(t)]K_n(t) + \dots + \\ + [1-K_1(t)][1-K_2(t)]\dots[1-K_m(t)]K_{m+1}(t)\dots K_n(t) \quad , \tag{5}$$

де t - час.

Відзначимо, що як число n є та шукана необхідна кількість енергетичних модулів, що повинна знаходитися в господарстві.

Для визначення ймовірності працездатного стану кожного з енергетичних модулів зручно скористатися теорією Марківських процесів. У цьому випадку процес експлуатації енергетичного модуля з позиції надійності полягає в тому, що об'єкт стрибком переходить із працездатного стану в непрацездатний в результаті відмови у випадковий момент часу, потім об'єкт стрибком переходить з непрацездатного стану в працездатний у результаті відновлення у випадковий момент часу і т.д. /1/. Даний підхід є досить розповсюдженим у теорії надійності. Відповідно до теоретичних положень, енергетичний модуль може знаходитися тільки в двох станах: працездатному чи непрацездатному. Періоди перебування в технічному обслуговуванні і перерви в роботі з організаційних причин з розгляду виключаються.

Математична модель експлуатації модульного агрегату представляється при цьому як сукупність двох елементарних потоків: потоку відмовлень і потоку відновлень. Для того, щоб одержати рішення задачі в замкнутому аналітичному виді, будемо вважати, що потоки подій для кожної машини мають властивості стаціонарності, відсутності післядії й ординарності. Будемо також вважати, що всі модульні агрегати машинного парку організації працюють у період нормальної експлуатації. Характерною рисою цього періоду є практично постійне значення інтенсивності потоку відмовлень при незмінних умовах експлуатації.

Для розміченого графа станів n енергетичних модулів справедлива така система диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{dK_1(t)}{dt} &= \mu_1 k_1(t) - \lambda_1 K_1(t); \\ \frac{dK_2(t)}{dt} &= \mu_2 k_2(t) - \lambda_2 K_2(t); \\ &\vdots \\ \frac{dK_n(t)}{dt} &= \mu_n k_n(t) - \lambda_n K_1(t). \end{aligned} \tag{6}$$

де λ_1, λ_2, ...,λ_n - інтенсивності потоку відмовлень при експлуатації енергетичних модулів. Якщо енергетичні модулі працюють з однаковими технологічними модулями в однакових умовах, то їх інтенсивності потоку відмовлень збігаються;

μ_1, μ_2, ..., μ_n - інтенсивності потоку відновлень.

Неоднорідні рівняння (6) мають загальне рішення у виді /1,2/

$$\begin{aligned} K_1(t) &= C_1 e^{-(\lambda_1+\mu_1)t_1} + \frac{\mu_1}{\lambda_1+\mu_1}; \\ K_2(t) &= C_2 e^{-(\lambda_2+\mu_2)t_2} + \frac{\mu_2}{\lambda_2+\mu_2}; \\ &\vdots \\ K_n(t) &= C_n e^{-(\lambda_n+\mu_n)t_n} + \frac{\mu_n}{\lambda_n+\mu_n}, \end{aligned} \tag{7}$$

де $C_1, C_2, \ldots, C_n$ - постійні інтегрування.

Інтенсивність потоку відновлень доцільно визначати експериментальним шляхом.

Інтенсивність потоку відмов може бути виражена в аналітичному виді в залежності від імовірності безвідмовної роботи енергетичного модуля $p(t)$

$$\lambda_j = \frac{1}{p_j(t)} \cdot \frac{dp_j(t)}{dt}. \quad (7)$$

В конструкції енергетичного модуля можна виділити кілька окремих структурних одиниць, що під час експлуатації машини сприймають свої характерні режими навантаження. До таких належать:

- двигун внутрішнього згоряння;
- трансмісія і ходове обладнання;
- металоконструкція енергетичного модуля;
- привод керування робочим обладнанням.

Оскільки структурна схема представляє собою ряд послідовно з'єднаних структурних елементів, кожний із який має свою імовірність безвідмовної роботи, то повна імовірність безвідмовної роботи машини буде визначатися за допомогою залежності

$$p_i(t) = p_{iЛ‰}(t) \cdot p_{i\ \mathrm{p}}(t) \cdot p_{im}(t) \cdot p_{i\cdot}(t), \quad (8)$$

де $p_i(t)$ - імовірність безвідмовної роботи двигуна;

$p_{imp}(t)$ - імовірність безвідмовної роботи трансмісії і ходового обладнання;

$p_{im}(t)$ - імовірність безвідмовної роботи металоконструкції модуля;

$p_{in}(t)$ - імовірність безвідмовної роботи привода робочого органа.

Кожен структурний елемент є складальною одиницею, що складається з кінцевого числа деталей. Імовірність безвідмовної роботи такої системи може бути визначена за відомою методикою.

Детальний аналіз структури складального елемента приводить до громіздких розрахункових залежностей. Разом з цим, фахівцями з області надійності /3/ показано, що при звичайних значеннях коефіцієнтів варіації ресурсів елементів v=0,2...0,8 немає необхідності враховувати ті елементи, середній ресурс яких у шість і більше разів перевищує середній ресурс найменш довговічного елемента. Більш того, виявилося, що в багатоелементних системах навіть якщо середні ресурси елементів близькі один до одного, немає необхідності враховувати всі елементи. Зокрема, при коефіцієнтах варіації ресурсу елементів $v \le 0{,}4$ можна враховувати не більше п'яти елементів. На практиці це дозволяє виконувати розрахунки тільки для найменш надійних деталей структурного елемента. Такі деталі можуть бути виявлені в результаті проведення випробувань на надійність або розрахунковим шляхом.

Для сільськогосподарських машин характерним є складний режим роботи окремих деталей, коли вони сприймають одночасний вплив разових динамічних навантажень, змінних у часі дія робочого навантаження і знос, або різні комбінації зазначених факторів. У загальному випадку для найменш надійних деталей кожного структурного елемента енергетичного модуля справедливі залежності виду

$$p_{iЛ}(t) = p^{(1)}_{iЛ}(t) \cdot p^{(2)}_{iЛ}(t) \cdot p^{(3)}_{iЛ}(t) \cdot p^{(4)}_{iЛ}(t), \quad (9)$$

де $p^{(1)}_{iЛ}(t)$ - імовірність безвідмовної роботи деталі (елемента) за критерієм статичної міцності;

$p_{iJb}^{(2)}(t)$ - імовірність безвідмовної роботи деталі (елемента) за критерієм міцності втомленості;

$p_{iJb}^{(3)}(t)$- імовірність безвідмовної роботи деталі (елемента) за критерієм зносу;

$p_{iJb}^{(4)}(t)$- імовірність безвідмовної роботи деталі (елемента) за критеріями впливу причин організаційного характеру.

На сьогодні розроблені досить надійні математичні моделі, що дозволяють розрахувати перераховані імовірності.

На підставі представленої інформації можна запропонувати таку методику розрахунку необхідної кількості енергетичних модулів:

1) на базі експериментальних досліджень і аналізу літературних джерел визначити режими навантаження основних систем енергетичного модуля при роботі з наявними в організації технологічними модулями;

2) розрахувати імовірність безвідмовної роботи енергетичного модуля в сполученні з кожним технологічним модулем;

3) визначити інтенсивності потоку відмов при роботі енергетичного модуля з кожним із технологічних модулів;

4) визначити інтенсивності потоку відновлень при роботі енергетичного модуля з кожним з технологічних модулів;

5) задати мінімально можливу кількість енергетичних модулів і скласти план-графік їхньої експлуатації;

6) оцінити за допомогою рівнянь Колмогорова імовірності працездатного стану для кожного енергетичного модуля в заданий момент часу (найбільш ймовірний момент надходження замовлення на термінову роботу);

7) розрахувати імовірність того, що в заданий момент часу організація зможе надати не менш *m* працездатних машин, і порівняти її з нормативною імовірністю;

8) якщо розрахункова імовірність нижче нормативної, число енергетичних модулей необхідно збільшити і розрахунки повторити.

Список літератури

1. Брауде В.И., Семенов Л.Н. Надежность подъемно-транспортных машин. - Л.: Машиностроение, 1986. - 183 с.
2. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов. - М.: Наука, 1975. - 319 с.
3. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. - М.: Высшая школа, 1988. - 238 с.

УДК 658.051.012

В.М. Савченко, канд. экон. наук, А.П. Бегун, асп.
Кировоградский национальный технический университет
И.С. Палий, асп.
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Определение приоритетности проектов на предприятии с помощью методов многокритериальной оптимизации

В данной работе представлены результаты анализа критериев многокритериальной оптимизации, обоснован выбор критерия Лапласа для решения поставленной задачи и приведены примеры использования данного критерия для принятия управленческих решений руководителями предприятий относительно определения приоритетности реализации проектов.
развитие предприятия, управленческие решения, оптимизация, критерий, выбор критерия

Развитие предприятия может осуществляться различными методами: параллельно основной деятельности, целенаправленно за счет реализации проектов развития, путем ведения рациональной маркетинговой и инвестиционной политики и т.д. Однако, в современных рыночных условиях, украинские промышленные предприятия могут развиваться лишь за счет реализации проектов создания и разработки новой продукции или услуг, которые требуют привлечения высококвалифицированных специалистов, обновления материально-технической базы, внедрения новых технологий. В процессе отбора проектов к реализации перед руководителями предприятий возникает задача выбора проектов, которые не только являются прибыльными, но и отвечают стратегиям развития. Данная задача является многокритериальной и не всегда может иметь однозначное решение, поскольку при оценке возникают множество вариантов ни лучших, не худших (множество оптимальных по Парето решений). Возникает вопрос, каким образом необходимо поступать в таком случае, на основе каких данных и с использованием каких методов можно получить рациональное решение.

Решению задач многокритериальной оптимизации при принятии управленческих решений уделяется не мало внимания [1-4]. Однако до сих пор отсутствуют модели и методы, позволяющие производить выбор альтернативных проектов к реализации в соответствие с определенными стратегическими направлениями развития предприятия. Это обуславливает актуальность решения данной задачи.

В данной работе представлены результаты анализа критериев многокритериальной оптимизации, обоснован выбор критерия Лапласа для решения поставленной задачи и приведены примеры использования данного критерия для принятия управленческих решений руководителями предприятий относительно определения приоритетности реализации проектов.

Критерии оценки эффективности проектов, как правило, являются зависимыми друг от друга или коррелируют между собой. Однако, в различных ситуациях, руководитель предприятия может ориентироваться на различные критерии и присваивать им различную важность относительно друг друга. В условиях определение приоритетности проектов, данный факт позволяет нам сделать допущение, что критерии независимы между собой, и их можно ранжировать. В условиях полной

© В.М. Савченко, А.П. Бегун, И.С. Палий. 2004

определенности по проектам руководитель предприятия может дать оценку важности по всем показателям. В условиях неопределенности, целесообразно применить равнозначность всех критериев, с целью избежания ошибочных расчетов по приоритетности проектов. Основными показателями эффективности проекта, которые будем использовать для оценки, являются [4]: чистый приведенный эффект (*NPV*), индекс рентабельности (*PI*), срок окупаемости (*PP*), норма рентабельности (*IRR*), а также вероятность возникновения рисковых обстоятельств (*p*), возможная величина ущерба при реализации риска (*S*). Необходимо произвести выбор проектов в соответствие со стратегией развития предприятия с использованием методов многокритериальной оптимизации на основе определенного множества показателей [2].

Выделение множества Парето при решении многокритериальных задач часто не является удовлетворительным решением. Это связано с тем, что при достаточно большом исходном множестве вариантов множество Парето оказывается недопустимо большим для того, чтобы лицо, принимающее решение (ЛПР) было бы в состоянии осуществить окончательный выбор самостоятельно. Таким образом, выделение множества Парето можно рассматривать лишь как предварительный этап оптимизации, и налицо проблема дальнейшего сокращения этого множества [1].

Анализ таких критериев расчета, как критерия Вальда, Гурвица, Сэвиджа и Лапласа, которые являются наиболее распространенными в области многокритериальной оптимизации, показал, что критерий Вальда лучше всего использовать тогда, когда руководитель желает свести риск от принятого решения к минимуму. Коэффициент важности в критерии Гурвица выбирается из субъективных соображений и не для всех показателей: чем более рисковая ситуация, тем больше ЛПР желает подстраховаться. Критерий Сэвиджа удобен, если необходимо выбрать одну альтернативу, имеющую минимальные потери, что не решает задачу определения приоритетности всех проектов. Таким образом, при данных критериях показатели исследуемых альтернатив обязаны быть однородными, что невозможно в нашем случае, а также критерии не позволяют разбить проекты (альтернативы) на три уровня приоритетности, так как, либо они не имеют оценки, либо оценочные показатели одинаковы у большинства проектов. Критерий Лапласа позволяет избежать недостатков предыдущих критериев. Наиболее удачно данный критерий может быть использован в условиях полной неопределенности, когда невозможно определить важности показателей по проектам.

Пусть матрица исходных данных для принятия решений по проектам P_1 - P_5 имеет вид (табл.1).

Таблица 1 - Матрица исходных данных для многокритериальных методов выбора

Проекты	Показатели проекта					
	NPV	PI	PP	IRR	p	S
P_1	10	5	2	5	0,2	30
P_2	8	3	5	0	0,5	50
P_3	4	2	4	1	0,3	45
P_4	8	1	7	3	0,8	60
P_5	9	1	3	2	0,7	70

Как было отмечено ранее, приоритетность проектов выделить довольно сложно. Выделение существенных для модели рассматриваемой экономической системы показателей качества альтернатив выбора, соответствующих поставленным целям, приводит к задаче векторной оптимизации, которая заключается в нахождении максимума вектор-функции:

$$F(x) = \left(f_1(x), f_2(x), ..., f_n(x)\right) \to \max_{x \in D}, \quad (1)$$

где D – область допустимых решений модели.

В рассматриваемой постановке множество допустимых планов есть совокупность альтернатив $D = \{A_1, A_2 .., A_m\}$, а значения критериев равны:

$$f_j(A_i) = e_{ij}. \quad (2)$$

Покажем применение некоторых методов многокритериальной оптимизации к решению задач планирования в системе управления проектами.

Для отбора проектов по приоритетности к каждой стратегии развития предприятия, необходимо задать строгие ограничения по максимальному, среднему и минимальному приоритету проектов.

Приведем пример по одной стратегии - стратегия роста, для которой характерны минимальный срок окупаемости проектов, завоевание новых рынков, стремление к максимальной прибыли. Каждый показатель по-своему важен, но имеет свои пределы и ограничения, что отображено в табл. 2. ($S_{рез}$ – сумма резервного фонда предприятия, $S_{соб}$ - сумма собственного фонда предприятия)

Таблица 2 - Ограничения по показателям для приоритетов проектов

Приоритеты проекта	Ограничения к показателям проекта					
	NPV	PI	PP	IRR	p	S
Максимальный	$NPV \to max$	$PI \to max$	$PP \to min$	$IRR \geq CCK$	$p \to 1$	$S \to max$
Средний	$NPV > 0$	$PI > 1$	$PP \to min$	$IRR \geq CCK$	$p \to 1$	$S \leq S_{рез}$ $(S \leq S_{соб})$
Минимальный	$NPV \geq 0$	$PI \geq 1$	$PP \to min$	$IRR \geq CCK$ $(IRR - CCK \geq 0)$	$p \to 1$	$S \leq S_{рез}$ $(S \leq S_{соб})$

Принятие решения со стороны ЛПР, может осуществляться как в условиях определенности по проектам и состоянию предприятия, так и в условиях неопределенности, что влечет за собой применение различных методов [4].

Как отмечалось выше, критерий Лапласа может быть применен в условиях неопределенности, когда ЛПР не может дать оценку каждому критерию. Данный критерий применяется, если важности неизвестны, но их можно считать равновероятными, т.е.

$$p_1 = p_2 = ... = p_n = 1/n. \quad (3)$$

Решающее правило в этом случае имеет следующий вид:

$$e(A^*) = \max\left\{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} e_{ij}\right\}. \quad (4)$$

В рассматриваемом примере, заменив значения NPV и S на обратную величину $f_j(A_i) = 1/e_{ij}$, имеем следующее решения (табл. 3).

Таблица 3 - Преобразованные исходные данные

Проекты	Показатели проекта					
	NPV	PI	PP	IRR	p	S
P_1	0,1	5	2	5	0,2	0,03333333
P_2	0,125	3	5	0	0,5	0,02
P_3	0,25	2	4	1	0,3	0,02222222
P_4	0,125	1	7	3	0,8	0,01666667
P_5	0,1111	1	3	2	0,7	0,01428571

$e(A^*)$ = max {(0,1+5+2+5+0,2+0,033)/6; (0,125+3+5+0+0,5+0,02)/6; (0,25+2+4+1+0,3+0,022)/6; (0,125+1+7+3+0,8+0,0166)/6; (0,111+1+3+2+0,7+0,0142)/6;} = max {2,055;1,440;1,262;1,990;1,137}=2,055.

Следовательно, с точки зрения критерия Лапласа можно выбрать проект P_1 как самый важный, а проект P_4 будет иметь самый низкий приоритет. Это поможет выстроить проекты в порядке их выполнения.

Рассмотрим вариант решения задачи при условии полной определенности, т.е. когда руководитель имеет полную информацию и может дать оценку каждому показателю проекта, т.е. определить важность каждого критерия.

Следуя тем же расчетам, только определив важности показателей по формулам

$$\sum_{j=1}^{n} \alpha_j = 1,\ \alpha_j > 0, \tag{5}$$

$$f_j(A_i) = e_{ij} \cdot \alpha_j, \tag{6}$$

можно получить следующий результат (табл. 4):

при $\alpha_1 = 0,3$; $\alpha_2 = 0,2$; $\alpha_3 = 0,2$; $\alpha_4 = 0,1$; $\alpha_5 = 0,1$; $\alpha_6 = 0,1$:

$e(A^*) = max$ {(0,03+1+0,4+0,5+0,02+0,003); (0,037+0,6+1+0+0,05+0,002); (0,075+0,4+0,8+0,1+0,03+0,002); (0,037+0,2+1,4+0,3+0,08+0,001); (0,033+0,2+0,6+0,2+0,07+0,001)} = max {1,95;1,68;1,41;2,02;1,10}=2,02.

Таблица 4 - Преобразованные исходные данные с учетом важности показателей

Проекты	Показатели проекта					
	NPV	*PI*	*PP*	*IRR*	*p*	*S*
P_1	0,03	1	0,4	0,5	0,02	0,00333333
P_2	0,0375	0,6	1	0	0,05	0,002
P_3	0,075	0,4	0,8	0,1	0,03	0,00222222
P_4	0,0375	0,2	1,4	0,3	0,08	0,00166667
P_5	0,0333	0,2	0,6	0,2	0,07	0,00142857

При таком условии максимальный приоритет имеет проект P_4, а минимальный приоритет – проект P_5.

Большая ответственность ложится на экспертов, при расстановке важностей по проектам, для этого необходимо иметь достаточно информации по проектам, ведь изменение в незначительной степени одного критерия может повлечь за собой различные результаты расчетов [3]. Для этого важно знать, что каждая стратегия развития предприятия преследует различные цели, которые сопровождаются своей индивидуальной приоритетностью по исследуемым показателям.

Таким образом, имея неоднозначность при выборе правильного решения ЛПР, используя метод многокритериальной оптимизации, решается вопрос развития предприятия и достижения поставленных целей при реализации выбранного множества приоритетных проектов и программ.

Предложенная модель может быть использована руководителями стратегического уровня управления предприятиями при выборе проектов создания новой продукции для реализации в соответствие с интересами предприятия.

Список литературы

1. Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кемпнер Л.М. Многокритериальная оптимизация: Математические аспекты. М.: Наука, 1989. – 128 с.
2. Айзерман М.А., Алескеров Ф.Т. Выбор вариантов: основы теории. – М.: Наука, 1990. – 240 с.
3. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
4. Кузин Б., Юрьев В., Шахдинаров Г. Методы и модели управления фирмой. – СПб: Питер, 2001. - 432с.

УДК 658.051.012

А.П. Бегун, асп.
Кировоградский национальный технический университет

Математическая модель отбора проектов создания новой техники к реализации с учетом стратегий развития производства

В данной работе предлагается формализованная модель отбора проектов к реализации в соответствие со стратегиями развития, которая является основой для разработки компьютерной системы поддержки принятия решений при управлении проектами на предприятиях с единичным и серийным типом производства.
оптимизация, критерий, выбор критерия

В настоящее время на производственных предприятиях много внимания уделяется стратегическому управлению. Большое значение приобретают вопросы стратегического менеджмента на предприятиях, занимающихся выпуском уникальной техники, поскольку без качественного анализа и оценки направлений дальнейшей деятельности невозможно эффективное управление производством. В связи с переходом к рыночным условиям хозяйствования все более широко используются методы и модели проектного управления, поскольку множество заказов на производство новых технических систем можно представить как ряд проектов, имеющих свои ресурсные, финансовые и временные ограничения. Эффективное управление проектами создания новой техники на различных временных горизонтах планирования может быть достигнуто только при условии, что реализация данных проектов будет не противоречить основным стратегическим направлениям развития предприятия. В связи с этим возникает множество задач, связанных с отбором перспективных проектов к реализации, рациональному финансированию и распределению ресурсов по проектам, учетом факторов риска в процессе реализации и проектов, определение возможности развития производства за счет реализации проектов и т.д.

Анализ работ по стратегическому менеджменту и управления проектами [1-5] показал, что существующие подходы и методы управления в современных рыночных условиях в основном носят рекомендательный характер и не дают возможности построения формализованных алгоритмов и процедур позволяющих решать вышеописанные задачи. Поэтому является актуальным разработка математичкой модели, позволяющей произвести отбор перспективных проектов к реализации в рамках стратегических направлений развития предприятий.

В данной работе предлагается формализованная модель отбора проектов к реализации в соответствие со стратегиями развития, которая является основой для разработки компьютерной системы поддержки принятия решений при управлении проектами на предприятиях с единичным и серийным типом производства.

Формализовано проект можно представить в виде совокупности следующих компонентов цель проекта; программа мероприятий; ресурсы; временные рамки проекта:

$$\Pr = \left\langle X^{\Pr}, G^{\Pr}, R^{\Pr}, T^{\Pr} \right\rangle, \quad (1)$$

где $X^{\Pr}$ – цель проекта;

© А.П. Бегун. 2004

G^{Pr} – программа мероприятий;
R^{Pr} – ресурсы;
T^{Pr} – временные рамки проекта.

Как правило, цель формулируется в виде перечня требований, которые должны быть достигнуты в результате выполнения проекта. Требования могут быть представлены в виде характеристик с указанием значений, которые должны быть достигнуты в результате выполнения проекта, т.е. цель проекта Pr_k может быть представлена в виде множества характеристик с указанием их значений:

$$X^{\mathrm{Pr}_k} = \{X_j\}^{\mathrm{Pr}_k}. \quad (2)$$

Значения характеристик могут быть:

- точечными $X_j = x_j$,
- интервальными $X_j = [x_j^a, x_j^b]$.

Стратегия отражает основные направления развития предприятия на долгосрочный период [1-2].

Так же, как и проект, стратегия может характеризоваться набором требований как финансового, так и нефинансового характера, описывающих целевое состояние предприятия:

$$Str = \langle Y^{Str}, T^{Str} \rangle, \quad (3)$$

где Y^{Str} – цель стратегии; T^{Str} – временные рамки стратегии.

Цель стратегии Str_m может быть представлена в виде набора требований с указанием целевых значений

$$Y^{Str_m} = \{Y_i\}^{Str_m}. \quad (4)$$

Значения требований могут быть

- точечными $Y_i = y_i$,
- интервальными $Y_i = [y_i^a, y_i^b]$,
- указано только направление оптимизации: максимизация или минимизация.

Текущее состояние предприятия также описывается в виде набора параметров: $P = \{P_l\}$. Все параметры текущего состояния имеют точечные значения $P_l = p_l$.

Деятельность предприятия сводится к реализации множества проектов. Выполнение проектов оказывает влияние на состояние предприятия, заставляя его обновлять материально-техническую базу, совершенствовать технологии, обучать сотрудников или нанимать новых специалистов, т.е. выполнение любого проекта воздействует на параметры предприятия, способствуя или препятствуя реализации стратегий. Таким образом, среди параметров любого проекта можно выделить те, которые связаны с одной или несколькими стратегиями:

$$\forall k \exists m : X^{\mathrm{Pr}_k} \bigcap Y^{Str_m} \neq \varnothing. \quad (5)$$

При планировании деятельности предприятия и выборе проектов для реализации следует отдавать предпочтение тем проектам, которые в наилучшей степени соответствуют стратегиям предприятия. Для этого следует сопоставить показатели, описывающие проекты и стратегии. Сложность этой задачи обусловлена следующими факторами:

- разные проекты могут характеризоваться различными показателями, не сравнимыми между собой;

- цели одного проекта могут в различной степени соответствовать нескольким стратегиям, не удовлетворяя ни одну из них в полной мере;

- стратегия характеризует долгосрочные цели предприятия, в то время как краткосрочные проекты преследуют достаточно близкие цели, поэтому реализация долгосрочной стратегии может потребовать выполнения большого количества проектов, каждый из которых лишь в небольшой мере обеспечивает достижение стратегических целей.

Поэтому, необходимо выработать правила, на основании которых должны сравниваться проекты и стратегии, описанные разнородными системами показателей.

Введём показатель стратегического эффекта проекта U^{km}, определяющий степень соответствия проекта Pr_k стратегии Str_m:

Показатель соответствия проекта Pr_k стратегии Str_m: $U^{km} \in [0,1]$. $U^{km} = 1$, если проект Pr_k полностью соответствует стратегии Str_m; $U^{km} = 0$, если проект Pr_k не соответствует стратегии Str_m; $0 < U^{km} < 1$, если проект Pr_k частично соответствует стратегии Str_m;

Рассмотрим определение этого показателя.

1. Вначале выполняется сопоставление временных сроков.

Стратегии разрабатываются на длительный, но всё же ограниченный период. Поэтому при анализе стратегии следует рассматривать только те проекты, которые не выходят за рамки её реализации. Проект Pr_k не соответствует стратегии Str_m, если срок его завершения выходит за временные рамки стратегии. В этом случае показатель соответствия равен нулю:

$$\left(T^{\mathrm{Pr}_k} > T^{Str_m}\right) \Rightarrow U^{km} = 0. \quad (6)$$

Для остальных проектов показатель соответствия определяется путём сопоставления стратегии и проекта по отдельным параметрам.

2. Сопоставление проектов и стратегий по отдельным показателям.

Введём показатель соответствия проекта Pr_k стратегии Str_m по параметру *i*. Он определяется путём сопоставления значений параметра стратегии Y_i с соответствующим параметром проекта X_i и параметром текущего состояния P_i с учетом направления изменения данного параметра.

Если в описании проекта параметр Y_i отсутствует, то показатель соответствия равен нулю:

$$\left(Y_i \cap X^{\mathrm{Pr}_m} = \varnothing\right) \Rightarrow U_i^{km} = 0. \quad (7)$$

Сопоставление параметров, имеющих точечные значения осуществляется путём сравнения целевых значений данного параметра в проекте и стратегии с учётом текущего состояния предприятия:

$$U_i^{km} = \frac{x_i - p_i}{y_i - p_i}. \quad (8)$$

Если в описании стратегии целевое значение параметра Y_i не указано, а указано только направление его оптимизации, то в качестве целевого значения принимается наилучшее значение соответствующего параметра из всех рассматриваемых проектов

$y_i = \max_k \left\{x_i^{\mathrm{Pr}_k}\right\}$, если Y_i – параметр максимизации,

$y_i = \min_k \left\{x_i^{\mathrm{Pr}_k}\right\}$, если Y_i – параметр минимизации.

Сопоставление параметров, имеющих интервальные значения, будет производиться по усредненной оценке

– на основе середины интервала:

$$x_i^d = x_i^a + \frac{x_i^b - x_i^a}{2},\ y_i^d = y_i^a + \frac{y_i^b - y_i^a}{2}. \quad (9)$$

$$U_i^{km} = \frac{x_i^d - p_i}{y_i^d - p_i}. \quad (10)$$

– пессимистическая оценка – на основе худшей границы интервала:

а) для параметров максимизации – оценка на основе нижней границы

$$U_i^{km} = \frac{x_i^a - p_i}{y_i^a - p_i}, \quad (11)$$

б) для параметров минимизации – оценка на основе верхней границы

$$U_i^{km} = \frac{x_i^b - p_i}{y_i^b - p_i}. \quad (12)$$

3. Обобщенная оценка соответствия.

После определения оценок соответствия по отдельным параметрам может быть рассчитан стратегический эффект проекта Pr_k относительно стратегии Str_m путём усреднения оценок по отдельным показателям. Для более гибкого учёта важности параметров могут быть введены весовые коэффициенты:

$$U^{km} = \frac{1}{N^{\mathrm{Str}_m}} \sum_{i=1}^{N^{\mathrm{Str}_m}} U_i^{km}, \quad (13)$$

где N^{Str_m} – количество параметров в описании стратегии Str_m.

Для более гибкого учёта важности параметров могут быть введены весовые коэффициенты:

$$U^{km} = \frac{1}{N^{\mathrm{Str}_m}} \sum_{i=1}^{N^{\mathrm{Str}_m}} w_i^{\mathrm{Str}_m} U_i^{km},\ \sum_i w_i^{\mathrm{Str}_m} = 1, \quad (14)$$

где $w_i^{\mathrm{Str}_m}$ – важность параметра Y_i в описании стратегии Str_m.

На основании показателя стратегического эффекта может быть решён целый ряд задач выбора проектов для реализации с учётом стратегий предприятия. Выбор может производиться по нескольким критериям, в зависимости от важности того или иного стратегического направления. Может быть предложен целый ряд критериев выбора проектов при различных ограничениях:

1. Максимизация суммарного стратегического эффекта при ограничении на общую стоимость проектов, выполняющихся в рамках стратегии Str_m

$$\begin{matrix} \sum_k U^{km} \to \max \\ \sum_k Z^{\mathrm{Pr}_k} \le S^{\mathrm{Str}_m} \end{matrix}, \quad (15)$$

где Z^{Pr_k} – затраты на проект Pr_k;

S^{Str_m} – средства, выделенные на реализацию стратегии Str_m.

2.Максимизация суммарного стратегического эффекта при ограничениях на общий расход ресурсов по предприятию

$$\sum_m \sum_k U^{km} \to \max$$
$$\sum_k R_l^{\Pr_k} \le R_l, \quad l = \overline{1, L} \qquad (16)$$

где $R_l^{\Pr_k}$ – затраты ресурсов вида l на проект $\Pr_k$;

R_l – доступный объем ресурсов вида l;

L – количество видов ресурсов.

3. Минимизация затрат на реализацию стратегии Str_m

$$\sum_k Z^{\Pr_k} \to \min$$
$$\sum_k U^{km} = 1 \qquad (17)$$

4. Максимизация прибыли при реализации стратегии Str_m

$$\sum_k S^{\Pr_k} \to \max$$
$$\sum_k U^{km} = 1 \qquad (18)$$

где $S^{\Pr_k}$ – прибыль от реализации проекта $\Pr_k$.

Критерии 1 и 2 целесообразно применять в тех ситуациях, когда развитие предприятия имеет более важное значение, чем текущие финансовые результаты. Критерии 3 и 4 целесообразно применять тогда, когда краткосрочные финансовые результаты важнее долгосрочных перспектив развития.

Таким образом, в данной работе формализован процесс отбора проектов к реализации в соответствии со стратегиями развития производства. Предложенная модель может быть использована для разработки информационной технологии по управлению проектами на производственном предприятии, которая может быть полезна высшему руководству в процессе принятия управленческих решений.

Список литературы

1. Ансофф И. Стратегическое управление./ Пер. с англ. М.: Экономика, 1989.- 306с.
2. Боумэн К. Основы стратегического менеджмента./ Пер. с англ. М.: Экономика, 1997.- 106 с.
3. Виханский О.С. Стратегическое управление: Учебник. - М.: Издательство МГУ, 1995.-252 с.
4. Гречикова И.Н. Менеджмент: Учебник. - 2-е издание., переработанное и доп. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1995.-480 с.
5. Управление проектами. / Н.И. Ильин, И.Г. Лукманова, А.М. Немчин и др.; Под общ. ред. В.Д. Шапиро. – Спб.: «ДваТрИ», 1996.– 432 с.

УДК 629.463.65

Л.А. Хмара, д-р техн. наук, Л.Н. Бондаренко, доц., канд. техн. наук
Національний авіаційний університет, м. Київ

Аналитическое решение некоторых задач прикладной механики на качение

Из соотношений, описывающих аналитическую зависимость между коэффициентом трения качения и механическими константами контактируемых деталей, решено ряд задач теоретической механики применительно к прикладной механике.

Доказано, что предложенная методика позволит ускорить процесс проектирования узлов качения и улучшить их показатели.

колесо, рельс, коэффициент трения качения, сопротивление качению

Рассмотрим ряд задач обычно рассматриваемых в курсе теоретической механики, но при задании наперёд величины коэффициента трения качения или вообще пренебрежением им.

Задача 1. Рассмотрим задачу о плоскопараллельном движении, приводимую практически в любом учебнике по теоретической механике.

Сплошной однородный круговой цилиндр (рис. 1) скатывается по наклонной плоскости без скольжения. Определить ускорение цилиндра ω_c [1].

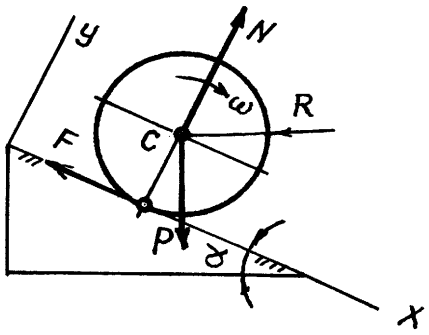


Рисунок 1 – Задача на ускорение при скатывании круглого тела

Не приводя решения, запишем окончательную формулу

$$\omega_c = \frac{2}{3} g \left(\sin\alpha - \frac{K}{R} \cos\alpha \right), \tag{1}$$

где α - угол наклона плоскости;

K – коэффициент трения качения цилиндра по плоскости;

R – радиус цилиндра.

Нетяжело заключить, что при

$$K = R tg\alpha \tag{2}$$

цилиндр будет скатываться без ускорения.

Табором [2], Джонсоном [3] и нами [4] доказано, что величина K может быть выражена через статическую полуширину пятна контакта b, т.е. через геометрические и механические константы контактируемых цилиндра и плоскости.

При линейном контакте

© Л.А. Хмара, Л.Н. Бондаренко. 2004

$$K = 0.225b\exp(-1.2R). \quad (3)$$

Поскольку при схеме касания цилиндр – плоскость [5]

$$b = 1.131\left[\frac{NR}{B}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)\right]^{1/2}, \quad (4)$$

где B - ширина цилиндра;

μ_1, μ_2, E_1, E_2 - коэффициенты Пуассона и модули упругости при вдавливании материалов цилиндра и плоскости;

$N = mg\cos\alpha$;

m - масса цилиндра.

Запишем выражение (2) в развёрнутом виде

$$1 = \frac{0{,}06476mg\cos\alpha}{BRtg^2\alpha}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)\exp(-2.4R). \quad (5)$$

Теперь предположим, что значения B, R, E_2, μ_2, α заранее известны, а неизвестными являются модуль упругости и коэффициент Пуассона материала цилиндра.

Выражение (5) даёт возможность определить такое отношение:

$$\frac{1-\mu_1^2}{E_1} = \frac{15{,}44BRtg^2\alpha\exp(2{,}4R)}{mg\cos\alpha} - \frac{1-\mu_2^2}{E_2}. \quad (6)$$

Таким образом, если качение цилиндра по плоскости будет равномерным, то значение $(1-\mu_1^2)/E_1$ будет равно правой части формулы (6). Для многих материалов $1-\mu_2^2 \approx 1$ и задача по определению модуля упругости материала цилиндра при вдавливании E_1 значительно упрощается.

Если, например, и величины μ_1, E_1 известны, то можно определить значения α, B, R или m. Выражение для определения экспериментально-аналитической величины массы цилиндра имеет вид

$$m = \frac{15{,}44BRtg^2\alpha\exp(2{,}4R)}{g\cos\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}. \quad 7)$$

Аналогичные формулы можно легко получить при любой схеме касания, а их практическое применение очевидно: если тело качения равномерно движется по плоскости, то можно экспериментально определить одну из восьми входящих в формулу (5) величин.

Задача 2. Установим условие качения без скольжения колеса по горизонтальном рельсовом пути. Обычно эта задача рассматривается как пример задачи на получение дифференциальных уравнений плоского движения твёрдого тела [6].

Сформулируем задачу так. Установить условие качения без скольжения по горизонтальному рельсовому пути колёсной пары с учётом сопротивления качению, которая находится: 1) под действием горизонтальной силы $\vec{P}$ приложенной к её оси или 2) под действием вращательного момента M. Масса колёсной пары равняется m, вертикальное давление на ось $\vec{Q}$, радиус колеса r, радиус инерции колёсной пары относительно её оси i_c, коэффициент сцепления f.

2.1. Направим ось x вдоль рельсового пути, а ось y - вертикально вверх (рис.2).

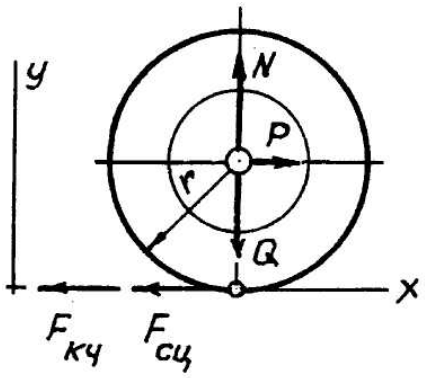


Рисунок 2 – К определению условия качения без скольжения

Дифференциальное уравнение движения колёсной пары под действием внешних сил $\vec{P}$, $\vec{N}$, $\vec{F}_{сц}$ и $\vec{Q}$, считая момент сил $F_{сц}$ и $F_{кч}$ положительным в случае совпадения с направлением вращения колеса

$$m\ddot{x}_c = P - F_{сц} - F_{кч}; m\ddot{y}_c = N - Q; I_c\ddot{\varphi} = \left(F_{сц} + F_{кч}\right)r. \quad (8)$$

Поскольку колёсная пара катится без скольжения, то мгновенный центр скоростей в точке контакта колеса с рельсом

$$\dot{x}_c = \vartheta_c = r\omega = r\dot{\varphi}; \ddot{x}_y = r\ddot{\varphi}. \quad (9)$$

Имея в виду, что $y_c = r = const$, то $\ddot{y}_c = 0$, а

$$N - Q = 0 \text{ и } N = Q. \quad (10)$$

Помня, что $I_c = mi_c^2$ и подставив это значение в уравнение (8), получим

$$mr\ddot{\varphi} = P - F_{сц} - F_{кч}; mi_c^2\ddot{\varphi} = \left(F_{сц} + F_{кч}\right)r. \quad (10)$$

Из этого уравнения

$$F_{сц} = \frac{\left[P - F_{кч}\left(1 + r^2/i_c^2\right)\right]i_c^2}{i_c^2 + r^2}. \quad (11)$$

Естественно, что здесь $F_{сц} \le fN$ и имеется в виду выражение (10), получим, что $F_{сц} \le fQ$, поэтому

$$\frac{\left[P - F_{кч}\left(1 + r^2/i_c^2\right)\right]i_c^2}{i_c^2 + r^2} \le fQ \quad (12)$$

или

$$P \le \left(fQ + F_{кч}\right)\frac{i_c^2 + r^2}{i_c^2}. \quad (13)$$

Если для рельса принять радиус закругления головки R, то в случае равенства модулей упругости при вдавливании материалов колеса и рельса, а также при условии, что их коэффициент Пуассона равен 0,3 [5]

$$F_{кч} = \frac{0.11Qn_a}{r}\sqrt[3]{\frac{N}{E}\frac{rR}{r+R}}\exp(0.2r), \quad (14)$$

где n_a - коэффициент, зависящий от соотношения коэффициентов уравнения эллипса касания $A/B = R/r$ [3] в случае $R\langle r$ (когда $R\rangle r$ необходимо принимать отношение r/R, изменив n_a на n_b).

Формула (13) устанавливает максимальную величину горизонтальной силы $\vec{P}$, приложенной к оси колёсной пары под действием которой она может катиться без скольжения с учётом трения качения колёсной пары по рельсу.

2.2. Если на колёсную пару действует вращательный момент M (ведущие колёсные пары), то сохраняя принятые выше направления координатных осей, дифференциальное уравнение движения колёсной пары

$$m\ddot{x}_c = F_{сц} - F_{кч}; m\ddot{y}_c = N - Q; I_c\ddot{\varphi} = M - \left(F_{сц} - F_{кч}\right)r\ . \tag{15}$$

Подставив выражения (9) и (10) в это уравнение, получим, что

$$F_{сц} = F_{кч}\frac{i_c^2 + r^2}{i_c^2} + \frac{\left(M + F_{кч}r\right)r}{i_c^2 + r^2}. \tag{16}$$

Поскольку $F_{сц} \le fN$, то в соответствии с (10) $F_{сц} \le fQ$, поэтому

$$F_{кч}\frac{i_c^2 + r^2}{i_c^2} + \frac{\left(M + F_{кч}r\right)r}{i_c^2 + r^2} \le fQ \tag{17}$$

или окончательно

$$M \le f\frac{Q\left(i_c^2 + r^2\right)}{r} - F_{кч}r\left[1 + \frac{\left(i_c^2 + r^2\right)^2}{i_c^2 r^2}\right]; \tag{18}$$

здесь M - максимальная величина вращательного момента, под действием которого не будет происходить буксование колёс.

Величина $F_{кч}$ в этой формуле определяется той же зависимостью (14).

Найдём величины P и M для первого и второго случаев с учётом и без учёта силы трения качения при следующих данных: $r = 475; R = 500$ мм; E=2,1·10^5 МПа; $[\sigma]$=960 МПа; $i_c = 0.98$ м; $m = 1600$ кг.

Вертикальное давление на ось найдём из формулы наибольших контактных напряжений при тех же условиях, что и в формуле (14)

$$Q = 2\frac{68r^2R^2[\sigma]^3}{n_p^3E^2(r+R)^2} = 162 \text{ кН};$$

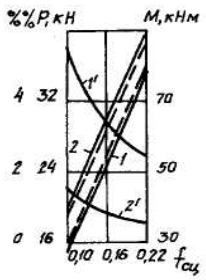
величина $F_{кч}$ при этой величине Q составит 236Н.

Графическая зависимость P, M от коэффициента сцепления колеса с рельсом показана на рис. 3. Здесь же показаны процентные расхождения значений P и M, полученные без учёта трения качения и с учётом.

Необходимо отметить, что если зафиксировать момент начала буксования колёс, то в случае 2.1 при известной величине P

$$P = \left[fN + 0.11n_a\sqrt[3]{\frac{N}{E}\frac{R}{r(r+R)}}\exp(0.2R)\right]\left(i_c^2 + r^2\right)/i_c^2 \tag{19}$$

и можно найти экспериментально любую из величин, которая входит в эту формулу, например f, N, E, r, R, i_c (естественно, другие величины должны быть заранее определены).



1 – горизонтальной силы P и 2 – момента M, найденных без учёта силы трения качения (пунктиром с учётом); 1', 2' – их процентные расхождения

Рисунок 3 – Зависимость от коэффициента сцепления колеса с рельсом

3. Аналогично решается задача об аналитическом определении усилий на роликах неприводных конвейеров.

В неприводных роликовых конвейерах [7] ролики имеют, как правило, цилиндрическую форму и вращаются на шарикоподшипниках и неподвижных осях (вращаются наружные кольца подшипников). Во многих случаях вместо цилиндрических применяются дисковые ролики, которые устанавливаются на специальных подшипниках и неподвижных осях. Их преимущество перед цилиндрическими состоит в том, что на криволинейных в плане конвейерах диски при прохождении грузов могут вращаться с разными угловыми скоростями и скольжение по ним грузов меньше, чем при цилиндрических роликах. Кроме того, их шаг в поперечном направлении может меняться в зависимости от габаритов транспортируемого груза. При транспортировании грузов цилиндрической формы (труб, круглой стали и т.п.) применяют парные наклонные ролики.

Одной из особенностей расчёта такого типа конвейеров является необходимость в особо точном расчёте угла наклона. Если угол на прямолинейном или изогнутом участках окажется меньше необходимого, то груз не будет передвигаться, в противном случае движение будет с ускорением; кроме того, увеличение значения угла требует увеличения габаритов, металлоёмкости, а, следовательно, и удорожания конструкции.

Одной из трудно определимых составляющих сопротивления движению груза по ролику или диску является сопротивление от качения груза по ним.

Поскольку основной формой грузов, транспортируемых этими конвейерами, являются плоские, то будем рассматривать схему касания цилиндр-плоскость.

Нами доказано [4], что для такой схемы контакта коэффициент трения качения может быть найден из формулы (3).

Величина b находится из соотношения (4) при подстановке соответствующих величин

$$b = 1.131\sqrt{\frac{PR_1}{B}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}, \tag{20}$$

где P - нагрузка, приходящаяся на ролик или диск;

B - ширина ролика или диска;

μ_1, μ_2, E_1, E_2 - коэффициенты Пуассона и модули упругости материала ролика и груза.

Таким образом,

$$K = 0.254\sqrt{\frac{PR_1}{B}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}\exp\left(-1.2R_1\right). \tag{21}$$

Особенность формулы (21) состоит в том, что величина P является величиной, зависимой от угла наклона, т.е. в точной постановке вместо величины P необходимо принимать $P\cos\alpha$, где α - угол наклона конвейера.

Теперь сопротивление качению груза по ролику или диску с учётом сопротивлений от трения качения

$$W_{кч} = \frac{PK}{R_1} = \frac{0.254P}{R_1}\sqrt{\frac{PR_1}{B}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1}+\frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}\exp\left(-1.2R_1\right); \tag{22}$$

от трения в подшипниках роликов

$$W_{пш} = P\frac{d\mu}{2R_1}, \tag{23}$$

где μ - коэффициент трения подшипников, приведенный к оси ролика;

d - диаметр оси.

Найдём сопротивление от перемещения груза по роликам для сообщения ему кинетической энергии. Самым неблагоприятным случаем будет такой, когда груз надвигается на неподвижный ролик ($t = \ell/\vartheta$, где ℓ - расстояние между роликоопорами) и

$$W_{ин} = \frac{I\vartheta^4}{2R_1^2 g\ell^2 f}, \tag{24}$$

где f - коэффициент трения скольжения между грузом и поверхностью ролика;

I - момент инерции ролика.

Поскольку движущей силой здесь будет

$$W_{дв} = P\alpha, \tag{25}$$

где α - угол наклона конвейера,

то приравняв последнее выражение сумме из выражений (22), (23), и (24) получим величину угла наклона конвейера при котором спуск груза будет происходить равномерно со скоростью, заданной в начале движения

$$\alpha = \frac{1}{R_1}\left[\frac{I\vartheta^4}{2R_1^2 g\ell^2 f} + \frac{\mu d}{2R_1} + 0.254\sqrt{\frac{PR_1}{B}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)}\exp(-1.2R_1)\right]. \tag{26}$$

Если ролик вращается по инерции, то первую составляющую в квадратных скобках нужно принять равной нулю.

Существенным отличием формулы (26) от её существующего аналога [7] является то, что в ней отсутствует довольно неопределённая величина коэффициента трения качения который, как оказывается, зависит от параметров $P, R_1, B, \mu_1, \mu_2, E_1, E_2$, характеризующих геометрические и механические характеристики контактируемых деталей.

Не менее существенным отличием формулы (26) от существующей является и то, что $W_{ин}$ зависит от явно влияющих на него величин, таких как I, f, которые отсутствуют в [7].

Анализ проведенных по формуле (26) расчётов показывает, что главной составляющей, влияющей на уклон гравитационного конвейера, является первая в формуле (26) – инерционная, поэтому при проектировании таких конвейеров в первую очередь необходимо стремиться уменьшить момент инерции ролика и увеличить коэффициент трения скольжения между поверхностями груза и ролика.

Для реальных значений при, например, металлическом грузе $W_{тш}$ на порядок ниже величины $W_{ин}$, а $W_{кч}$ - на два порядка.

Несколько по иному выглядит соотношение между W в конвейерах для круглых деталей. Если угол развала роликов β, то значения $W_{ин}$, и $W_{тш}$ определяются аналогично формулам (23) и (24) при замене P на $G = G_0 \sin(\beta/2)$, где G_0 - вес, приходящийся на один ролик.

Сопротивление от качения по одному ролику определяется из выражения

$$W_{кч} = 0{,}11 G n_b \sqrt[3]{\frac{G}{E}\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}\exp(0.2R_1), \tag{27}$$

где R_2 – радиус транспортируемого груза;

n_b - коэффициент, зависящий от соотношения коэффициентов уравнения эллипса касания [5].

Здесь уже, в зависимости от нагрузки на ролик, значения $W_{кч}$, $W_{пш}$ и $W_{ин}$ могут быть одного порядка.

Особо остановимся на соотношении между сопротивлением движению плоского груза по ролику и диску. Если ширина ролика задаётся конструктивно в соответствии с габаритами транспортируемых грузов, то ширина диска должна быть проверена на допускаемое контактное давление или определена из формулы

$$b_д = \frac{1.526}{0.418}\frac{R[\sigma_{max}]}{E}. \qquad (28)$$

Расчёты показывают, что при двух дисках, воспринимающих нагрузку, сопротивление движению по ним в несколько раз превышает сопротивление по ролику, поэтому к их применению надо относиться осторожно ибо преимущество на поворотной части конвейера может быть даже не компенсировано дополнительными сопротивлениями на прямолинейном участке.

Анализ полученных формул и графиков на рис. 3 позволяет сделать следующие выводы:

- на условие качения колеса без скольжения как под действием горизонтальной силы, так и вращательного момента существенное влияние оказывает сила сопротивления качению колеса по рельсу;
- при известном моменте начала проскальзывания колеса на рельсе можно найти экспериментально такие величины, как коэффициент сцепления колеса с рельсом с учётом сопротивления качения, приведенный модуль упругости материалов колеса и рельса, радиус инерции и некоторые другие константы;
- получаемые значения углов наклона гравитационных конвейеров несколько выше, чем предлагаемые в существующей литературе;
- предложенная методика более удобна при пользовании, поскольку содержит геометрические и прочностные константы материалов ролика и транспортируемого изделия;
- расчёт по этой методике позволит более точно определить угол наклона конвейера, уменьшить металлоёмкость несущей конструкции и его стоимость.

Список литературы

1. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики, М.: Наука, 1970. – 478с.
2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия, М.: Мир, 1989. – 510с.
3. Tabor D. The mechanism of rolling friction: the elastic range. Proc. Roy. Soc. Ser. A. Vol. 229, 1955. P. 198-211.
4. Бондаренко Л.Н. Зависимость коэффициента трения качения колёс по рельсу от режима работы механизма передвижения // Строитель. и дорож. маш. 1999. №6. С. 40.
5. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. К.: Наук. думка, 1988. 736с.
6. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. В 2т. , 2. М.: Высш. шк., 1977. – 532с.
7. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1983. 487с.

УДК 629.735.02 :744 (045)

О.Т. Башта, доц., канд. техн. наук, О.В. Джурик, В.І. Макаров
Національний авіаційний університет, м.Київ
В.А. Петренко, д-р техн. наук
Кіровоградський національний технічний університет

Порівняння різних способів зображення загальних видів вузлів літальних апаратів

Пропонується порівняльний аналіз різних способів зображень вузлів складального креслення, які застосовуються в технічній документації.
креслення, способи зображення, аксонометрія, вибухова схема, вузел

Для отримання робочих креслень деталей виробу по складальному кресленню необхідно виконати деталювання, як вирішальний етап проектування. Вміння деталювати складальне креслення тісно пов'язане з умінням "прочитати" складальне креслення.

Прочитати складальне креслення - це уявити собі форму виробу і кожної його деталі, пояснивши призначення, будову і принцип роботи виробу, роль, яку виконує кожна деталь, способи їх з'єднання між собою, взаємодію рухомих частин виробу, її контури - задача не з легких, оскільки на складальному кресленні одні деталі перекривають інші.

У ЄСКД прийняті загальні правила зображення загальних видів креслень у певній послідовності.

Вся ця послідовність проведення робіт відома, і якщо вузол достатньо простий, то немає необхідності виконувати інші види зображення. Проте останнім часом, у зв'язку з швидким розвитком авіаційної техніки, істотно ускладнилися конструкції окремих вузлів: збільшилась кількість використовуваних деталей, матеріалів і т.д.

Більшість вузлів, як правило, виконують розширену кількість функцій, що забезпечується кількістю взаємозалежних, іноді дрібних деталей. Для їхнього показу необхідно зображувати багато перерізів, вирізів. Креслення загального виду таких вузлів найчастіше важкі для сприйняття і розуміння. Тому, іноді застосовується такий спосіб зображення як вузол в аксонометрії з різноманітними вирізами. Таке зображення дає уявлення про принципову роботу головних деталей вузла, проте далеко не всіх.

В наш час для показу всіх деталей складального вузла усе частіше застосовується схема, що називається «вибуховою». По цій схемі деталі вузла цілком виймаються з корпусних деталей і показуються в аксонометрії, кожна окремо в просторі уздовж осі в строгій послідовності їхнього знаходження всередині корпуса.

Зазначена схема зображень набору деталей в аксонометрії має свої додаткові правила взаємного розташування деталей. Звичайно у центрі зображують вузлову корпусну деталь. Потім від корпусної деталі розходяться осьові лінії (при необхідності) у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, по яких в аксонометрії в просторі в необхідній послідовності розташовуються окремо одна за одною деталі і вузли. Якщо деталей на осі багато, то частина їх умовно виноситься окремо, паралельно своїй осі (як би її продовження).

На рис. 1 показано «вибухову схему» аксіально-плунжерного насосу НП–90.

Таким чином, зображення складального вузла може бути виконано трьома способами:

© О.Т. Башта, О.В. Джурик, В.І. Макаров, В.А. Петренко. 2004

– креслення загального виду;
– аксонометрія вузла з різноманітними вирізами;
– «вибухова» аксонометрія вузла.

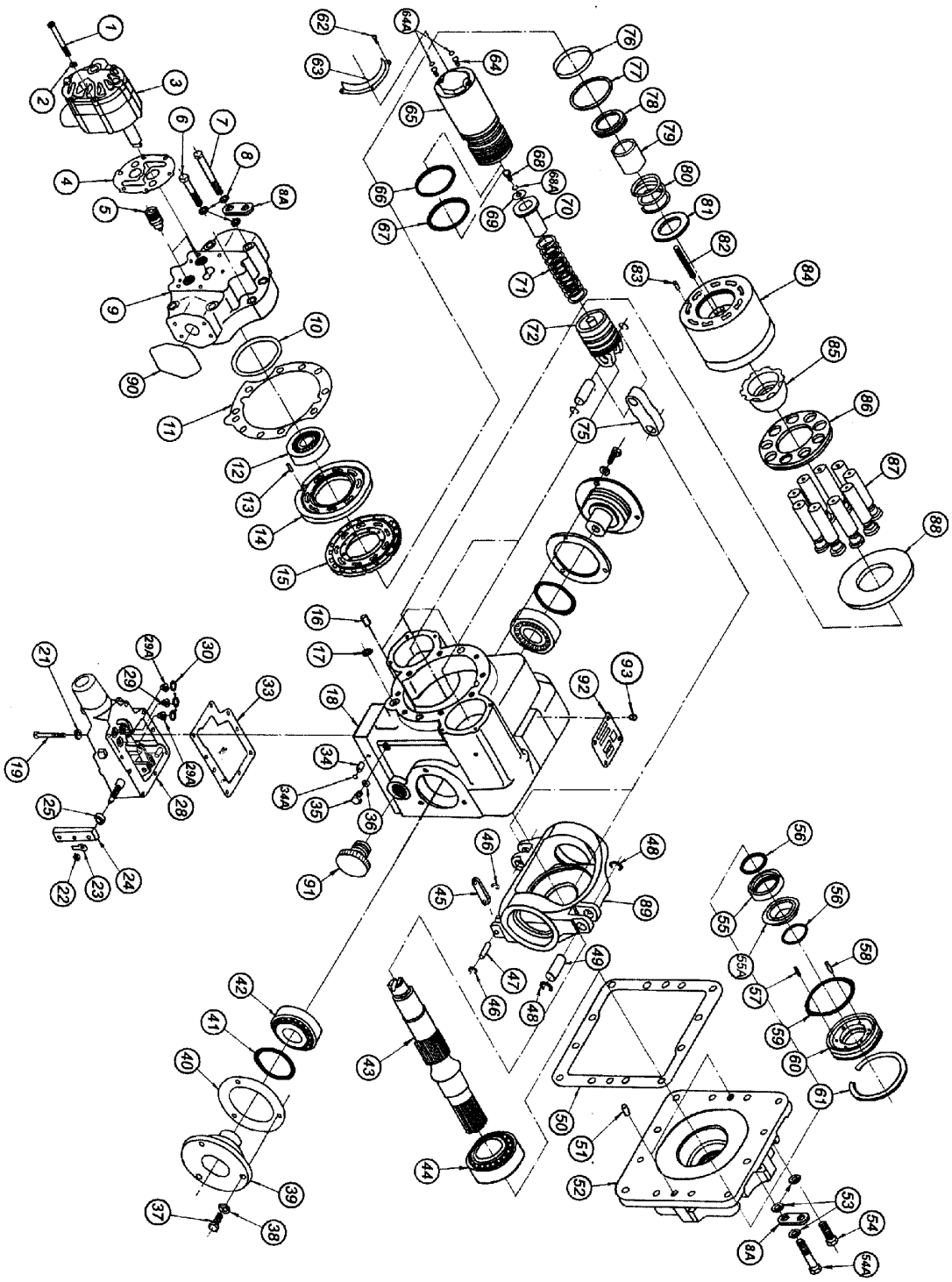


Рисунок 1 – «Вибухова схема» аксіально-плунжерного насосу НП-90

Кожний із цих способів має свої особливості, що недостатньо освітлені в літературі по інженерній графіці. Тому з'явилася необхідність проведення порівняльного аналізу вищевказаних способів зображення складальних вузлів.

Аналіз був проведений на прикладі аксіально-плунжерного насосу НП–90.

Розглядалися креслення цієї конструкції, які були виконані трьома вищевказаними способами. Іспити були проведені на контрольній групі з 30 студентів 5 курсу механічного факультету Національного Авіаційного Університету. Замірявся час, витрачений кожним студентом, і необхідний для повного розуміння складових вузла, послідовності їх складання.

Після цього, для кожного способу зображення складального вузла за результатами вимірів підраховувався середньоарифметичний затрачений час по формулі:

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2 + ... + t_n}{n},$$

де *t1, t2...tn* – час затрачений 1, 2... *n* студентом.

Отримані результати подані на рис. 2.

Рисунок 2 – Порівняння витрат часу на читання складального креслення для різних способів зображення складальних одиниць

З приведених результатів очевидно, що найбільш простим для розуміння конструкції вузла і складових, які входять у цей вузол, є «вибухова» аксонометрична схема. Проте цей спосіб зображення складального вузла не дає такого повного уявлення про форму і розміри деталей, що входять у цей вузол, як це робить креслення складальних вузлів. Для складних складальних вузлів доцільно суміщувати два способи зображення вузлів. Були проведені комбінації:

Креслення загального виду + «вибухова» аксонометрія вузла.

Креслення загального виду + аксонометрія вузла з різноманітними вирізами.

Результати іспитів, які показані на рис.3 показали, що найкращим варіантом, що дає найбільш повне уявлення про конструкцію вузла і складових його деталей при мінімальних витратах часу, являється суміщення складального креслення і «вибухової» аксонометрії вузла.

Рисунок 3 – Порівняння витрат часу на “читання” складального креслення при смішенні різних способів зображення складальних одиниць

У результаті проведеної роботи можна зробити висновок, що доцільно в документи, що супроводжують складні складальні вузли, вводити як креслення загального виду, так і «вибухову» аксонометрію, що значно полегшить і поліпшить сприйняття всієї інформації, що стосується даного вузла.

Список літератури

1. Башта Е.Т. Сравнительный анализ различных способов изображения сборочного узла / Вестник национального технического университета Украины "КПИ", Машиностроение, т.2. К., 2000.
2. Башта Е.Т. Джурик Е.В Практика применения "взрывных схем" в КМУГА, ДТУ, 1999.
3. Левицкий В.С. Машиностроительное черчение. – М: Высшая школа, 1988. – 351с.
4. Иллюстрированный каталог деталей и сборочных единиц самолета ТУ-154. Книга 2, М., Транспорт, 1980. –152с.
5. Боголюбов С.К. Черчение. – М.: Машиностроение, 1989.– 333с.

УДК 621.9.048.4

В.М. Боков, доц., канд. техн. наук, І.А. Гросул, асп.
Кіровоградський національний технічний університет

Фізичний механізм існування електричної дуги в потоці робочої рідини

Із використанням метода швидкісної фотореєстрації, розглянуто динаміку горіння електричної дуги в гідродинамічному поперечному потоці органічного середовища. Визначено часові та частотні характеристики елементарного акту ерозії.

електрична дуга, гідродинамічний режим, розмірна обробка, осцилографування, кінозйомка та надшвидкісна фотореєстрація дуги

Електрична дуга як явище відома людству вже більше 200 років. Вперше її спостерігав та описав В. В. Петров в 1802 році. Форма електричного розряду в повітрі, яку він отримав, була серпоподібною, в зв'язку з викривленням стовпа розряду під впливом конвективних потоків нагрітого розрядом повітря. Цей факт визначив назву розряду "дуга", яка збереглася по теперішній час, хоча в більшості випадків аналогічний розряд не має дугоподібної форми. В промисловості широко використовуються дугові розряди в повітрі (в металургії, в зварювальній техніці, в плазмотронах, як джерело освітлення для прожекторів та кінопроекційній апаратурі тощо), та дугові розряди в рідині (в установках для очищення литва від формувальної суміші з використанням електрогідравлічного ефекту, при зварюванні під водою тощо). Слід відмітити, що у всіх вище наведених випадках електричні дуги збуджуються в нерухомих або малорухомих (плазмові дуги) середовищах, мають низькі енергетичні характеристики та великі геометричні параметри, а саме тому непридатні для точного формоутворення поверхонь.

В роботі [1] Носуленко В. І. показав, що суттєве підвищення енергетичних характеристик та зменшення розмірів електричної дуги можна досягнути при збудженні її в поперечному потоці робочої рідини, керованому за гідродинамічним тиском, а процес з її використанням отримав назву способу розмірної обробки дугою (РОД). При реалізації способу РОД гідродинамічний потік робочої рідини в між електродному проміжку (МЕП) виконує потрійну функцію:

- визначає енергетичний стан електричної дуги. Так, із підвищенням динамічного тиску потоку $P_д$ (тиску в напрямку течії робочої рідини): напруженість електричного поля E в стовпі дуги різко зростає і, порівняно зі звичайними зварювальними та плазмовими дугами, за інших рівних умов (сили струму та напруги), в десятки разів вища, досягає 3 кВ/см і більше, та відповідає напруженості в стовпі нестаціонарного (імпульсного) електричного розряду в умовах відомих способів електроерозійної обробки [1]. Густина струму в дузі j зростає і досягає 50 кА/см^2, а порівняно зі звичайними та плазмовими дугами, принаймні в декілька разів більше і відповідає густині струму в стовпі нестаціонарного електричного розряду в умовах відомих способів обробки [1];

- визначає геометричний стан електричної дуги як інструмента для розмірної обробки поверхонь. Із підвищенням динамічного тиску потоку $P_д$ площа поперечного перерізу дуги S зменшується і, порівняно зі звичайними та плазмовими дугами, принаймні в декілька разів менша; довжина дуги L зменшується в десятки разів. Так, прошивання отворів способом РОД звичайно здійснюється при зовнішніх бічних

© В.М. Боков, І.А. Гросул. 2004

міжелектродних зазорах (МЕЗ), які визначаються довжиною дуги, в межах від 0,02 мм до 0,25 мм.

- відповідає за процес вилучення продуктів ерозії із зони обробки, та інтенсифікує його, чим забезпечує передумови стабілізації процесу обробки.

Спосіб РОД вже сьогодні дозволяє простими засобами ввести в зону обробки технологічні потужності в широкому діапазоні, а саме від 60 Вт до 30 кВт (верхня межа обмежена лише технічно) і тим самим забезпечити високопродуктивну обробку, яка принаймні на порядок перевищує продуктивність відомого способу електроімпульсної обробки та досягає декілька десятків тисяч мм^3/хв.

Подальше будування якісної теорії електричної дуги в поперечному потоці робочої рідини здійснювалося в напрямку вивчення фізичного механізму її існування.

Осцилограми сили технологічного струму та напруги процесу РОД фіксують інтегральну картину і практично не відрізняються від аналогічних осцилограм при зварюванні та лише підтверджують факт безперервного горіння електричної дуги в часі, але не визначають час горіння дуги на одному місці (рис. 1). В той же час, як відомо, електрична дуга в умовах РОД дискретна в просторі [1]. Це пов'язано з накладанням ходу процесів в одному елементарному акті на хід процесів в другому, тобто з відсутністю принципу адитивності процесу ерозії, якій має місце в електроімпульсній обробці. Саме тому, інтегральний ефект процесу ерозії при РОД не являє собою просту суму дії одиночних розрядів, а більш різноманітний та складніший. Крім того, він залежить від гідродинамічного фактору.

Для експериментального підтвердження залежності послідовності збудження електричних розрядів від напрямку та шидкості потоку в торцевому міжелектродному зазорі, інтегральний процес горіння дуги спостерігали методами відеозйомки в спеціальному експериментальному пристрою (рис. 2) з використанням відеокамери GR401X (Франція) формату VHS-C, об'єктив Digital 50^x. Частотота зйомки – 25 кадр/с.

Картину розвитку подій, що відбуваються при горінні електричної дуги в умовах РОД на одному місці, фіксували за допомогою надшвидкісного фотореєстратора СФР, який працює в режимі лупи часу. Частота зйомки – до 10000 кадр/с. Для цього використовували той самий спеціальний експериментальний пристрій, в якому плоскі електроди (сталевий та графітовий), товщиною 1 мм, шириною 10-15 мм, встановлювали між двома пластинами із оргскла з можливістю зустрічного осьового переміщення сталевого електрода від електрогідравлічної слідкуючої системи електроерозійного верстата "Дуга-8Г" [2, с. 48]. Пластини герметично закріплювали в пристрої, який забезпечував плоскопаралельне прокачування робочої рідини крізь торцевий МЕЗ під статичним тиском на вході в нього до 1,5 МПа. Режим РОД: сила технологічного струму 20 А, напруга на дузі 30 В, статичний тиск рідини 0,8 МПа, полярність – пряма (Fe^+), робоча рідина – органічне середовище.

Синхронізацію електричних параметрів дуги (сили струму I та напруги на дузі U) з кадрами надшвидкісної зйомки (індекс Δ) здійснювали шляхом осцилографування з використанням АЦП-плати (рис. 3).

Експериментально доказано (рис. 4), що електрична дуга в умовах РОД рухається в торцевому міжелектродному зазорі за напрямом течії робочої рідини. З фізичної точки зору останнє пояснюється тим, що під дією робочої рідини, продукти ерозії (дрібнодисперсні розжарені частки металу) рухаються в зазорі за напрямком потоку, створюючи при електропроводні містки (слабкі контакти) між електродами, які є осередками збудження електричних дуг.

Однак концентрація продуктів ерозій в зазорі біля розряду K, а також їх розміри b залежать від швидкості потоку V в ньому.

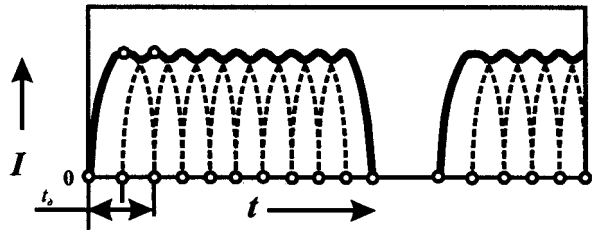


Рисунок 1 – Модельне уявлення про зміну у часі t сили струму I при усталеному процесі РОД: t_0 - час горіння дуги на одному місці

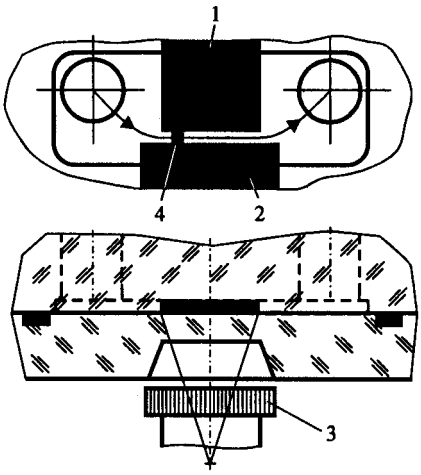


Рисунок 2 – Схема експериментального пристрою: 1 – анод; 2 – катод; 3 – відеокамера; 4 - дуга

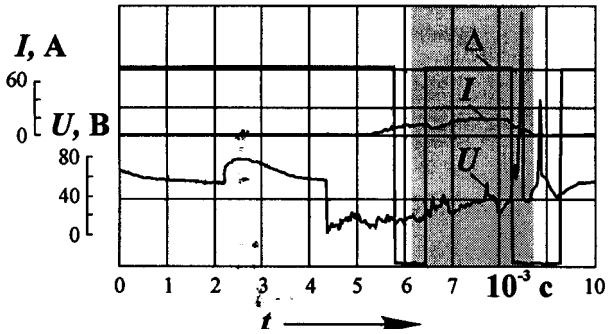


Рисунок 3 – Типова осцилограмма синхронізації параметрів I, U та індексу експонування Δ

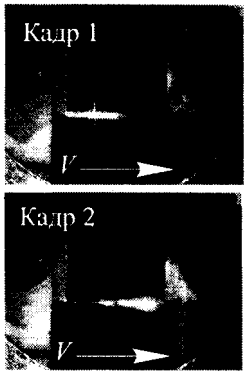


Рисунок 4 – Кадри відеозйомки дуги в поперечному потоці рідини. Частота зйомки – 25 к/с

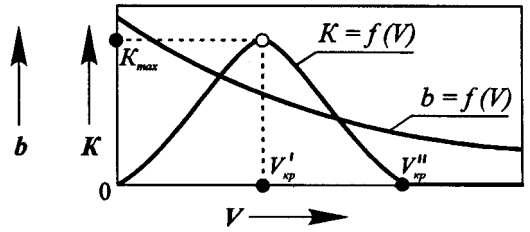


Рисунок 5 – Якісні залежності $K=f(V)$ та $b=f(V)$

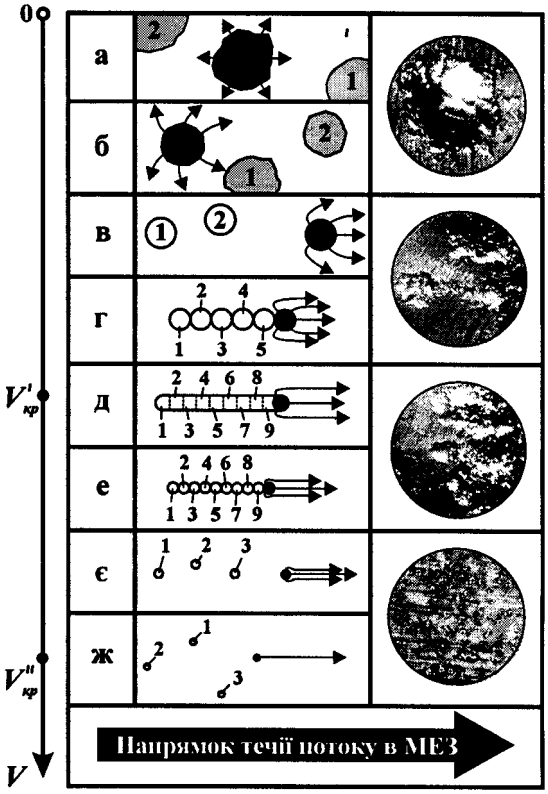
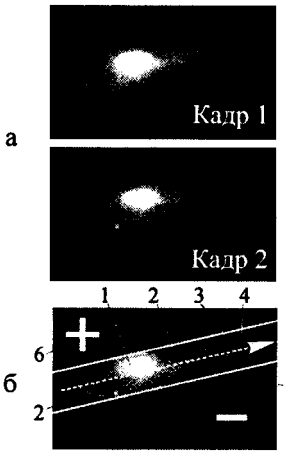


Рисунок 6 – Вплив швидкості потоку на послідовність збудження електричної дуги в міжелектродному зазорі, розміри та форму електроерозійного сліду



1 – стовп дуги:
2 – газова порожнина;
3 – міжелектродний зазор;
4 – напрямок потоку рідини;
5 – електрод нижній;
6 – електрод верхній.

Рисунок 7 – СФР-грама дуги в поперечному потоці рідини (а) та уявлення про її форму (б). Частота зйомки – 6400 к/с

Вивчення розмірів та форми електроерозійних слідів та продуктів ерозії в залежності від швидкості потоку дозволило встановити наступне:

- залежність концентрації K від швидкісті потоку V (рис. 5) носить екстримальний характер;

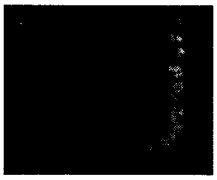
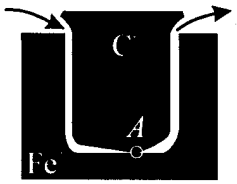
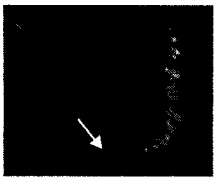
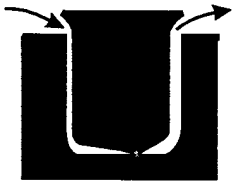
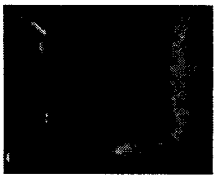
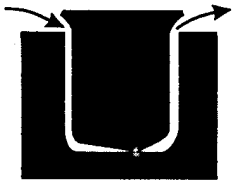
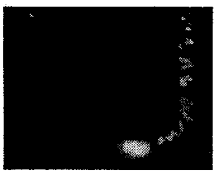
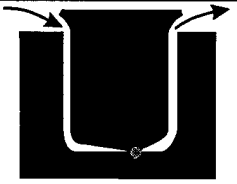
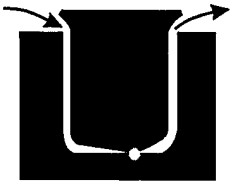
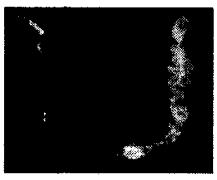
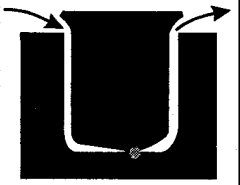
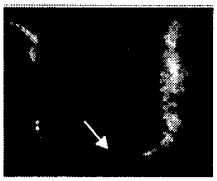
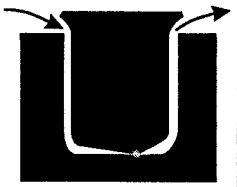
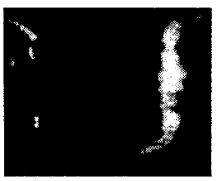
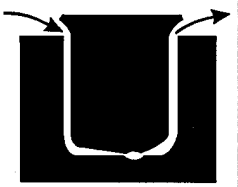
- із підвищенням швидкості потоку V розміри електроерозійного сліду та продуктів ерозії b зменшуються (рис. 5);

- швидкість потоку V, як показано на рис. 6, впливає на послідовність збудження електричної дуги в міжелектродному зазорі, розміри та форму електроерозійного сліду.

Із аналізу результатів швидкісної зйомки дуги в поперечному потоці робочої рідини (табл. 1) та раніш отриманої інформації [3, с. 22-29] виходить наступна послідовність елементарного акту ерозії електродів. Процес починається з слабкого контактування електродів з подальшим їх нерівномірним нагріванням (в місці контакту електродів на кадрах 3-8 спостерігається слабке світіння, що збільшує з часом яскравість) до утворення рідкої фази. Із зростанням температури навколо місця контакту утворюється та розвивається газова порожнина. Приблизно через 800...900 μс з моменту контакту електродів, тобто коли минуло 28...32 % часу з початку елементарного акту ерозії, збуджується електрична дуга. Розвиток її супроводжується взаємодією з потоком робочої рідини, але не безпосередньо, а через газову порожнину як тепловий демпфер. При цьому інтенсивність охолодження зовнішніх шарів газової порожнини, а отже можливість зміни енергетичних та геометричних параметрів дуги, фізично залежить від зміни динамічного тиску потоку в МЕЗ, тобто від гідродинамічного фактору. Так, для енергетичного та геометричного стиснення дуги достатньо підвищити динамічний тиск рідини в МЕЗ, що, як правило, досягається при підвищенні статичного тиску на вході потоку в МЕЗ. Як бачимо із кінограми, дуга існує в МЕЗ приблизно 700...1200 μс, що складає 25...43 % часу елементарного акту ерозії. Далі дуга вибухає, що супроводжується термічним викидом рідкої фази з лунки на ЕЗ як в потік, так і на торцеву поверхню ЕІ, і затухає, а газова порожнина продовжує розширятися. За оцінками Золотих Б. М. [4], екстремальний тиск в газовій порожнині при електроіскровій обробці вимірюється сотнями атмосфер, а при максимальному розширенні є негативний. В свою чергу, негативний тиск в газовій порожнини в умовах РОД приводить до закипання та викиду додаткової порції металу з лунки. Як експериментально доказано в роботі [3], після руйнування газової порожнини на гарячі ділянки графітового ЕІ та на перенесений на них матеріал ЕЗ осаджуються частки графіту, що є продуктом пролізу органічної робочої рідини.

Таким чином, на торцевій (робочій) поверхні ЕІ формується двофазовий металографітовий шар, який сприймає тепловий удар від подальшого збудження дуги в цьому місці, руйнується дугою, та одразу відновлюється (точніше самовідновлюється), і тим самим суттєво зменшує електроерозійний відносний знос графітового ЕІ. В роботі [2, с. 120] показано, що товщина металографітового шару залежить від гідродинамічного фактору та з підвищенням швидкості потоку в МЕЗ зменшується. Якщо товщина шару менша деякої оптимальної величини, відносний знос графітового ЕІ зростає і може досягати декілька відсотків, а якщо менша – знос не тільки зменшується, але і при відповідних умовах може бути негативним [5, с. 96] Негативний знос – негативне явище, бо приводить до шлакуванню МЕП та дестабілізації процесу обробки при надто низьких швидкостях потоку. Оптимальний знос графітового ЕІ при РОД сталі лежить в межах від 0,05 до 1,0 %, що дозволяє забезпечити достатньо точну металообробку деталей основного та допоміжного виробництв.

Таблиця 1 – Кадри швидкісної зйомки дуги в поперечному потоці органічного середовища. Швидкість зйомки – 9 600 к/с

№ кадру	Кадр	Схема	Відлік часу, с	Послідовність елементарного акту ерозії
1			0,0001	Контакт електродів в точці *A*
3			0,0003	Нерівномірне контактне нагрівання електродів. Утворення та розвиток газової порожнини. Утворення рідкої фази на ЕЗ.
8			0,0008	
9			0,0009	Збудження та розвиток дуги. Взаємодія потоку зі стовпом дуги через газову порожнину як тепловий демпфер.
14			0,0014	
16			0,0016	
20			0,0020	Вибух дуги. Термічний викід рідкої фази з лунки ЕЗ в потік та на торцеву поверхню ЕІ. Затухання дуги. Розширення газової порожнини до максимальних розмірів. Вскіпання та викид додаткової порції металу з лунки. Руйнування газової порожнини. Осаджування на гарячі ділянки ЕІ та на перенесений на них матеріал ЕЗ графіту від піролізу робочої рідини.
28			0,0028	

Частоту n проходження елементарних електроерозійних актів при РОД в загальному випадку можна оцінити наступною формулою

$$n = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_0 \pm t_n},$$

де T – час між суміжними елементарними актами ерозії, c;

t_0 - тривалість елементарного акту ерозії. Зазначимо, що t_o, що зафіксував фотореєстратор (див. табл.1), складає 0,0028 c;

t_n – час перекриття суміжних елементарних актів ерозії, c (або час одночасного існування двох суміжних актів).

Знак "-" визначає обробку з перекриттям елементарних актів ерозії за часом, а знак "+" – обробку з паузами, які мають місце при різних формах дестабілізації процесу. Теоретичний діапазон зміни часу t_n при РОД без пауз знаходиться в межах від 0 до t_0. Так, коли $t_n = 0$, елементарні акти ідуть послідовно один за другим, а коли $t_n = t_0$, елементарні акти ідуть паралельно. Можливість одночасного горіння двох и трьох дуг підтверджується роботою [1]. Але найбільш імовірною послідовністю проходження елементарних актів є коливання процесу навколо середнього значення часу $t_n = 0{,}5\ t_0$. З урахуванням цього середня частота проходження елементарних актів ерозії в умовах експерименту буде складати $n = 714$ Гц.

Експериментальне дослідження дуги в поперечному потоці органічного середовища за допомогою СФР-грам дозволило виявити її форму, яка нагадує форму комети (рис. 7) з характерною деформованою передньою частиною (передня частина газової порожнин, де відбувається взаємодія потока дугою), ядром (стовп дуги) та довгим хвостом (задня розтягнута частина газової порожнини).

Список літератури

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Дис... д-ра техн. наук: 05.03.07.- Кіровоград, 1998.– 389 с.
2. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ "Імекс ЛТД", 2002. – 300 с.
3. Боков В. М. Фізичний механізм електроерозії при розмірній обробці дугою // Вісник Інженерної академії України. Вип. 2. – Київ: ТОВ "Поліпром", 2002, С. 22-29.
4. Золотых Б. Н. О физической природе электроискровой обработки металлов. – В кн.: Электроискровая обработка металлов. Вып. 1. – М.: Изд-во АН СССР, 1957.

УДК 621.775.8

Н.В. Шепельский, проф., д-р техн. наук
Кировоградский национальный технический университет

Статистическая модель формирования механических свойств выпрессовок из металлических гранул

На основании анализа второго инварианта тензор деформации материального эллипсоида дана статистическая оценка прочности схватывания деформированных гранул в волокновой выпрессовки в зависимости от степени их деформации.

Технология получения металлических волокон посредством прессования осесимметричных частиц (гранул) сопровождается адгезионной связью (схватыванием) ювенильных поверхностей контактируемых тел при интенсивных сдвиговых деформациях. Прочность такого схватывания определяет возможность получения рапушенных волокон в выпрессовке и ее определение экспериментальным путем затруднено.

прочность, выпрессовка, деформация гранул, адгезионной связью, поверхность тел, прессование

В работе [1] показано, что для сыпучих металлических материалов компоненты второго инварианта тензора деформации материального эллипсоида представляют собой коэффициенты обновления контактной поверхности элементарного кубика подвергаемого деформации:

$$I_2 = K_{on(yz)} + K_{on(yz)} + K_{on(zx)}, \tag{1}$$

где $K_{on(xy)}, K_{on(yz)}, K_{on(zx)}$ – частные значения коэффициентов обновления контактной поверхности элементарного кубика соответственно в плоскостях xy, yz и zx.

Выясним физический смысл второго инварианта тензора материального эллипсоида (1), для чего рассмотрим формоизменение элементарного кубика со стороной a, деформируемого в очаге пластического течения при осесимметричном прессовании с коэффициентом вытяжки μ (направление прессования совпадает с осью x). В случае монотонной деформации исходный элементарный кубик со стороной a и площадью поверхности $S_0 = 6a^2$ преобразуется в результате деформации в параллепипед со сторонами $a\mu, a/\mu^{1/2}, a/\mu^{1/2}$ и суммарной площадью боковой поверхности $S = 2a^2(\sqrt{\mu} + 1/\mu + \sqrt{\mu})$. Тогда в соответствии с уравнением для оценки коэффициента обновления поверхности получим:

$$K_{on} = S/S_0 = 1/3\left(\sqrt{\mu} + 1/\mu + \sqrt{\mu}\right). \tag{2}$$

Тензор материального эллипсоида для случая осесимметричного прессования имеет вид:

$$T = \begin{vmatrix} U_x & 0 & 0 \\ 0 & U_y & 0 \\ 0 & 0 & U_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mu & 0 & 0 \\ 0 & 1/\mu & 0 \\ 0 & 0 & 1/\mu \end{vmatrix}. \tag{3}$$

Второй инвариант данного тензора определится:

$$I_2 = \sqrt{\mu} + 1/\mu + \sqrt{\mu}\,. \tag{4}$$

Сравнивая (2) и (4) имеем:

© Н.В. Шепельский, 2004

$$I_2 = 3K_{on}\,. \qquad (5)$$

Аналогичное соотношение имеет место и для других монотонных процессов ОМД, таких как прокатка, прессование полос, протяжка, осадка, волочение и т.д.

Таким образом, можно заключить, что для монотонных процессов ОМД второй инвариант тензора материального эллипсоида с точностью до постоянного множителя равен коэффициенту обновления контактной поверхности элементарного кубика, подвергаемого деформации.

Анализируя составляющие уравнения (2) для случаев осесимметричного прессования нетрудно заметить, что обновлению контактной поверхности подвергаются лишь плоскости параллельные направлению прессования, а плоскости перпендикулярные направлению прессования сокращаются по площади и не вносят вклад в формирование прочного сварного соединения. Из этого следует, что эти поверхности можно рассматривать как дефекты, ослабляющие сечение полуфабриката.

Принимая статистический характер распределения данных дефектов по сечению выпрессовки оценку схватывания проведем с позиции вероятности разрушения. Учитывая, что для волокон из алюминиевых гранул, полученных прессованием с коэффициентом вытяжек не более шести проявляется хрупкий характер разрушения, воспользуемся трехпараметрическим распределением Вейбулла [2]:

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\delta}\right)^{\psi}\right\}, \qquad (6)$$

где σ – случайная величина напряжения разрушения;

σ_0 – нижняя граница изменения случайной величины напряжения разрушения;

δ – параметр масштаба;

ψ – параметр функции распределения.

Дадим оценку нижней границы изменения случайной величины σ_0.

С этой целью рассмотрим модель волокновой выпрессовки в виде конгломерата исходных сферических частиц, уплотняемых в контейнере круглого сечения, что является начальной стадией процесса прессования, рис.1. Определим коэффициент обновления контактной поверхности гранул в плоскости перпендикулярной направлению прессования при следующих упрощающих допущениях:

- в процессе деформации исходная сферическая частица преобразуется в цилиндр;

- деформация в объеме сферической частицы протекает таким образом, что радиусы исходной сферы деформируются без искривлений.

Выделим на поверхности исходной сферической частицы кольцо площадью

$$\Delta S = S_{c(n+1)} - S_{c(n)},$$

где $S_{c(n+1)}$, $S_{c(n)}$ – площадь боковой поверхности сектора, образованная соответственно радиусом $\rho_{ox(n+1)}$ и $\rho_{ox(n)}$.

Из геометрических соотношений

$$S_{c(n+1)} = 2\pi\rho_0\left(\rho_0 - \sqrt{\rho_0^2 - \rho_{ox(n+1)}^2}\right),$$

$$S_{c(n)} = 2\pi\rho_0\left(\rho_0 - \sqrt{\rho_0^2 - \rho_{ox(n)}^2}\right),$$

где ρ_0 – радиус исходной сферы.

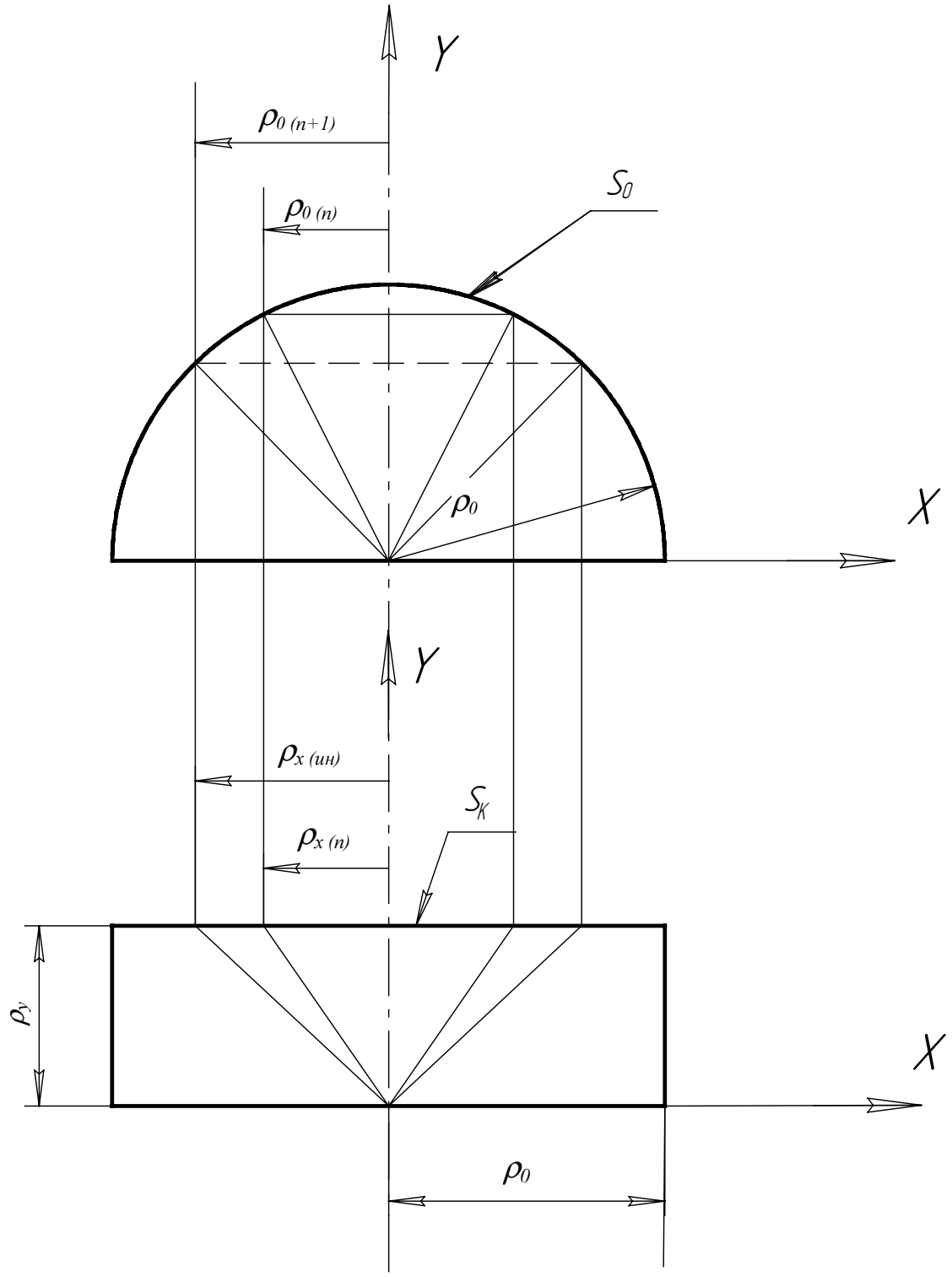


Рисунок 1 – К оценке обновления поверхности гранул в процессе деформации

В результате деформации сферы радиусы $\rho_{ox(n+1)}$ и $\rho_{0(n)}$ переходят соответственно в радиусы $\rho_{x(n+1)}$ и $\rho_{x(n)}$ на торцевой поверхности цилиндра. Численные значения данных радиусов определим из условия равенства объемов соответствующего

сектора сферической частицы и конуса сформированного цилиндра. Объем секторов сферической частицы имеет вид:

$$V_{c(n+1)} = 2/3\,\pi\rho_0^2\left[\rho_0 - \sqrt{\rho_0^2 - \rho_{0x(n+1)}^2}\right], \quad (7)$$

$$V_{c(n)} = 2/3\,\pi\rho_0^2\left[\rho_0 - \sqrt{\rho_0^2 - \rho_{0x(n)}^2}\right], \quad (8)$$

а объем соответствующих конусов

$$V_{k(n+1)} = 1/3\,\pi\rho_{x(n+1)}^2\rho_y, \quad (9)$$

$$V_{k(n)} = 1/3\,\pi\rho_{x(n)}^2\rho_y. \quad (10)$$

Принимая во внимание, что $\rho_x/\rho_0 = X$ и $\rho_{ox}/\rho_0 = X_0$ из уравнений (7-10) получим:

$$X_{(n+1)} = \sqrt{\frac{2\rho_0}{\rho_y}\left[1 - \sqrt{1 - X_{0(n+1)}^2}\right]},$$

$$X_{(n)} = \sqrt{\frac{2\rho_0}{\rho_y}\left[1 - \sqrt{1 - X_{0(n)}^2}\right]}$$

где $X_{(n+1)}, X_{(n)} -$ относительное значение радиуса кольцевого слоя, лежащего на торцевой поверхности цилиндра. По известным значениям относительных радиусов $X_{(n+1)}$ и $X_{(n)}$ находим соответствующие площади $S_{k(n+1)}$ и $S_{k(n)}$

$$S_{k(n+1)} = \pi X_{(n+1)}^2, \quad (11)$$

$$S_{k(n)} = \pi X_{(n)}^2. \quad (12)$$

Согласно определению:

$$K_{on} = \frac{S_{k(n+1)} - S_{k(n)}}{S_{c(n+1)} - S_{c(n)}} \quad (13)$$

и принимая во внимание, что $\rho_y/\rho_0 = \nu_0/\nu$ имеем:

$$K_{on} = \frac{\nu}{\nu_0}, \quad (14)$$

где $\nu_0, \nu -$ исходная и текущая относительная плотность.

Принимая для гранул алюминиевых сплавов в свободном насыпном состоянии $\nu_0 \approx 0{,}5$ и используя полученное нами в работе [1] уравнение для оценки напряжения разрушения σ_p:

$$\sigma_p = \sigma_в\left(1 - \frac{1}{K_{on}}\right), \quad (15)$$

получаем $\sigma_p = 0{,}5\sigma_в$.

Полагая, что в процессе прессования гранул сформированная при брикетировании прочность схватывания сохраняется, считаем, что минимальная прочность выпрессовки в случае совпадения всех дефектов в одной плоскости, перпендикулярной оси прутка, будет равна половине максимальной прочности, $\sigma_0 = 0{,}5\sigma_{ma.}$.

Принимая, что математическое ожидание $\overline{\sigma}$ находится на середине интервала изменения напряжения, имеем $\sigma_0 = (2/3)\overline{\sigma}$. Параметр масштаба δ найдем исходя из допущения о равенстве медианы распределения и математического ожидания [2]:

$$\overline{\sigma} = \sigma_0 + \delta(\ln 2)^{1/\psi}, \tag{16}$$

откуда

$$\delta = (\overline{\sigma} - \sigma_0)/(\ln 2)^{1/\psi}. \tag{17}$$

Учитывая, что для большинства алюминиевых сплавов, подвергаемых испытанию на растяжение $\psi >> 1$[1] имеем:

$$\delta = \overline{\sigma} - \sigma_0 = \overline{\sigma}/3. \tag{18}$$

Коэффициент ψ определяет степень однородности структуры [3], которая зависит от коэффициента вытяжки, то есть $\psi = f(\mu)$. Тогда функция распределения (6) для модельного материала примет вид:

$$F_{(\sigma)} = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{3\sigma - 2\overline{\xi}}{\overline{\sigma}}\right)^{\psi}\right\}. \tag{19}$$

Экспериментальная проверка подтвердила возможность аппроксимации опытных данных уравнением (19) при конкретном значении параметра формы ψ (например, для гранулированного материала из свинца $\psi = \mu^{0,47}$).

Таким образом, на основании анализа второго инварианта тензора деформации материального эллипсоида дана статистическая оценка прочности схватывания волокновой выпрессовки из дискретных тел в зависимости от коэффициента вытяжки.

Список литературы

1. Шепельский Н.В., Корнилов В.Н. Влияние обновления контактной поверхности гранул на прочность их схватывания. Технология легких сплавов. 1985, №2, с. 22-25.
2. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
3. Чарухин К.Е., Голованенко С.А., Мастеров В.А., Казаков Н.Ф. Биметаллические соединения. – М.: Металлургия, 1970. – 280 с.

ЗМІСТ

Жеженко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. Генерирование интергармоник нелинейными нагрузками и методы их расчета 3

Родькин Д.И. Комментарий к теории энергопроцессов с полигармоническими сигналами 10

Осадчук Ю.Г., Сінолиций А.П., Кальмус Д.О. Ресурсоенергозберігаючі аспекти електромеханічних систем і обладнання енергоємних установок 19

Набока Б.Г., Гладченко В.Я., Беспрозванных А.В. Оценка ресурса коаксиальных силовых проводов по потере массы ПВХ-пластикатов 24

Плєшков П.Г., Віхрова Л.Г., Кубкін М.В. Аналіз видів невизначеності інформації, характерних для процесу управління системами електропостачання 29

Чорний О.П., Лашко Ю.В., Донченко О.А. Інтелектуальний пристрій захисту асинхронних двигунів 34

Лю Г.П., Туркин Д.Г. Проблемы транспорта и потребления электрической энергии в жилищно-коммунальном секторе Приморского края 41

Виштибеев В.И., Виштибеев А.В. Обеспечение надежного электроснабжения в воздушных сетях 6-35 Кв 46

Виштибеев А.В. Об электромагнитной совместимости устройств электротехнических комплексов 53

Артеменко А.Н. Исследование процесса самовозбуждения двигателя постоянного тока 60

Гладир А.І., Юхименко М.Ю., Гомілко В.І. Технологія автоматизованого проектування в лабораторному практикумі 65

Колб А.А. Управляемые статические устройства компенсации реактивной мощности сети и стабилизации напряжения 70

Коренькова Т.В., Михайличенко Д.А., Кравец А.М. Технологические и энергетические возможности насосной станции с активным регулированием параметров 78

Заквасов В.В., Морозов А.А., Прилипко А.В., Величко Т.В. Комплекс для исследования энергопроцессов в электромеханических системах 86

Огарь В.А. К определению насыщения электротехнической стали асинхронных двигателей 91

Ряшенцев А.Ю. Автоматизация процесса диагностики электротехнической стали асинхронных двигателей 95

Шокарев Д.А., Пасечник В.И., Рыков Г.Ю. Обоснование структуры систем формируемых источников аварийного электропитания 100

Шокарев Д.А., Пасечник В.И., Рыков Г.Ю. Математическое моделирование и экспериментальные исследования асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением 105

Калинов А.П. Анализ методов идентификации электромагнитных параметров синхронных двигателей 110

Козловский А.А., Орлович А.Е. Прогнозирование обледенения проводов воздушных линий электропередачи 119

Котиш А.І., Гарасьова Н.Ю. Оцінка визначення ізолюючої спроможності опорних ізоляторів за струмами витоку 123

Переверзев И.А., Свиридов А.П., Корзаватых М.И. Использование аппарата сети Петри для моделирования процесса управления электроэнергетическими объектами 127

Савеленко І.В., Плєшков С.П. Економічна ефективність керування графіками навантажень переробними підприємтвами сільського господарства 132

Сергиенко С.А., Черный А.П. О необходимости испытаний электрических машин с учетом технологической нагрузки 136

Серебренніков С. В., Кондратьев О. І. Енергозбереження в регульованих електроприводах з перетворювачами частоти на IGBT-транзисторах 142

Серебренніков Б.С. Маркетингове управління енергоспоживанням на роздрібному ринку електроенергії 147

Плєшков П.Г., Віхрова Л.Г., Сіріков О.І. Імовірносна оцінка вузлової несиметрії струмів в електричних мережах 154

Черный А.П. Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии 160

Плєшков П.Г., Комнатний О.В. Прогнозування графіків навантаження побутових споживачів сільськогосподарських районів 169

Пожуев В.И., Пазюк Ю.М. Алгоритм расчета структуры полидисперсных железорудных материалов на спекательных тележках агломашин 176

Ладанюк А.П., Іващук В.В. Використання адаптивної селекції сигналів в задачах оперативної ідентифікації 183

Пазюк М.Ю., Миняйло Н.А. Повышение эффективности усреднения железорудных материалов в закрытых емкостях 188

Козак Ю.А., Михайленко В.С. Нечеткое управление системой приготовления сырьевой смеси в цементном производстве 193

Лисенко В.П., Головінський Б.Л., Решетюк В.М., Руденський А.А. Енергоощадний алгоритм управління умовами утримання курей-несучок у промисловому пташнику 199

Беляев Ю.Б., Грабовский Г.Г., Иевлев Н.Г., Корбут В.Б., Ушаков А.В. Автоматизированная компьютерно-интегрированная технология и система гидросбива окалины с поверхностей горячего металла 205

Сікірда Ю.В., Шмельова Т.Ф., Єніна І.І. Формування структури інформаційного забезпечення системи підтримки прийняття рішень авіадиспетчера в позаштатних польотних ситуаціях 212

Артеменко О.В., Жесан Р.В., Симак В.М. Оценивание предполетной информации методами нечетких множеств 218

Павлова В.В., Жесан Р.В. Нейросіткова модель прогнозу індивідуальних інформаційних потреб авіадиспетчерів 222

Смітюх Я.В., Кишенько В.Д. Модель брагоректифікаційної установки як об'єкта керування 229

Войтюк В.В., Версаль В.О., Єніна І.І. Компенсація впливу зміни електропровідності рідини на перетворювач швидкості в датчику витрат молока 235

Смирнов В.В., Смирнова Н.В. Применение механизма прерываний микроконтроллеров для реализации однопроводного асинхронного интерфейса передачи данных 240

Плєшков С.П., Осадчий С.І., Некрасов А.В. Математичні моделі електричних навантажень сільськогосподарського виробництва в автоматизованих системах контролю та управління 243

Воробєйчик В.Я., Гайдукова С.М. Автоматизація контролю якості зерна у Франції 247

Кондратець В.О., Сербул О.М. Оптимізація структури засобів управління кульовим млином з циркулюючим навантаженням 256

Осадчий С.І., Куценко О.В., Шаповалова І.А. Обгрунтування методики розробки системи автоматичної імітації динаміки складного комплексу 266

Єрмолаєв Ю.О., Савеленко Г.В. Розробка САУ електромеханічного приводу станка типу "Дуга" на базі "ЭШИМ–1" 270

Віхрова Л.Г., Слюсаренко Т.О. Дослідження параметрів автоматизованої системи температурно-вологісного поля в приміщенні багатапрольотної теплиці 274

Зубенко В.О., Версаль В.О. Ефективність роботи автоматичної системи діагностики захворювання тварин маститом 279

Жесан Р.В., Флакей І.В. Аналіз сучасного програмного забезпечення для оцінки енергетичного потенціалу місцевості, моніторингу, керування та оптимізації вітрових електростанцій 283

Гуцул В.І., Шалімова М.О., Шалімов В.О. Елементи математичної моделі дозатора сипких матеріалів із трьохплечовим коромислом 290

Осадчий С.І., Саула О.А., Гуцул В.І. Модель динаміки каналу передачі даних як елемента системи автоматизації виробничого процесу 295

Єрмолаєв Ю.О., Сидоренко О.В., Окольчишен М.О. Аналіз рівня автоматизації початкових стадій технологічного процеса хлібозавода №3 300

Саинсус А.Д., Черновол М.И., Кропивный В.Н., Надворный Б.Е. Повышение абразивной износостойкости стрельчатых культиваторных лап дифференцированной индукционной наплавкой 306

Ломакин В.Н., Кропивный В.Н., Горюк М.С. Использование численного моделирования для описания процесса затвердевания чугунного шара 314

Петренко М.М., Скриннік І.О. Зерносушильна установка касетного типу для сушки зернових культур 319

Петренко М.М., Богатирьов Д.В. Порядок визначення основних параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною 323

Шмат С.І., Резніченко В.А. Прогнозування надійності нових машин за результатами випробувань 328

Калашнік Д.В., Минайленко Р.М. Побудова фільтру на основі нелінійних елементів для вимірювання електричних сигналів з завадою короткочасної дії та великої амплітуди 334

Мещишен Д.К., Мещишена Л.Г. Вдосконалення математичної моделі процесу зміни залежності коефіцієнта піднімальної сили від кута атаки протягом тривалої експлуатації літака 338

Артеменко Д.Ю., Шмат С.І. Розробка нових конструкцій прикочуючих котків з використанням програмного комплексу COSMOSWorks 342

Філімоніхін Г.Б., Невдаха Ю.А. Зміна габаритних розмірів автобалансуючого пристрою при зміні кількості корегуючих вантажів 348

Бобир М.І., Філімоніхін Г.Б. Інженерні умови зрівноваження роторів у рамках різних плоских моделей 351
Філімоніхін Г.Б., Майоров В.С. Вплив приєднаної маси на динаміку ротора при просторовому русі 357
Пархоменко М.Д., Пархоменко Ю.М., Єніна І.М. Імітація руху сівалки при визначенні якості висіву в лабораторних умовах 362
Валявський І.А. База даних для прогнозування розвитку технологічного обладнання з паралельною кінематикою 370
Мещишен Д.К. Дослідження зміни тягових характеристик авіаційних двигунів протягом тривалої експлуатації 376
Кузнєцов Ю.М., Хамуйела Т.О., Крижанівський В.А. Системно-морфологічний підхід при створенні затискних пристроїв для затиску призматичних заготовок 381
Кузнецов Ю.М., Эль-дахаби Ф.В. Системно-морфологический подход при синтезе высокоскоростных зажимных патронов 388
Мельничук П.П., Степчин Я.А. Керування стійкістю токарних твердосплавних різців в умовах віброактивності технологічної обробної системи 399
Струтинський В.Б., Колот О.В. Застосування методів спектрального аналізу процесів при діагностичних випробуваннях гідравлічних амортизаторів 405
Мельничук П.П., Виговський Г.М., Лоєв В.Ю., Сніцар В.Г., Ковальов В.В. Дослідження геометричних характеристик плоских поверхонь після фінішної обробки комбінуванням різання і ППД 410
Тихенко В.Н., Гнатюк А.П., Королькова М.В. Управление гидроприводом подачи инструмента в станке для глубокого сверления 417
Шепельський Н.В., Свяцький В.В., Свяцька Л.П. Вплив деформаційних умов і виду розділового середовища на контактне схоплювання адгезійно-сумісних металів 421
Немировский Я.Б., Чернявский А.В. Особенности обработки гильз ДВС деформирующим протягиванием 425
Котов Б.І., Степаненко С.П. Механіко-математична модель руху твердої частинки у віброзрідженному шарі зерна 433
Амосов В.В. Аналіз процесу відокремлення насінин від присмоктувальних отворів вакуумного пневмомеханічного висівного апарата 438
Лізунков О.В., Шевченко В.О. Методика вибору енергетичних модулів до сільськогосподарських машин 445
Савченко В.М., Бегун А.П, Палий И.С. Определение приоритетности проектов на предприятии с помощью методов многокритериальной оптимизации 450
Бегун А.П. Математическая модель отбора проектов создания новой техники к реализации с учетом стратегий развития производства 454
Хмара Л.А., Бондаренко Л.Н. Аналитическое решение некоторых задач прикладной механики на качение 459
Башта О.Т., Джурик О.В., Макаров В.І., Петренко В.А. Порівняння різних способів зображення загальних видів вузлів літальних апаратів 466
Боков В.М., Гросул І.А. Фізичний механізм існування електричної дуги в потоці робочої рідини 470
Шепельский Н.В. Статистическая модель формирования механических свойств выпрессовок из металлических гранул 476