

УДК 621.311.019.03

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.105-116>

**Ф.М. Ерхан**, проф., д-р техн. наук, **Н.И. Корнейчук**, проф., канд. техн. наук  
*Государственный аграрный университет Молдовы, Кишинев, Молдова*  
*e-mail: terhan@mail.ru*

## Влияние износа подшипниковых щитков на коэффициент мощности электродвигателей переменного тока

В статье произведен анализ и оценка составных частей электродвигателей и электрических приводов сельскохозяйственных машин и оборудования, подлежащих восстановлению и было установлено, что наиболее изношенных частей электродвигателей являются подшипниковые щиты. Исходя из проведенных измерений различных типов подшипниковых щитков (чугунные и из алюминиевых сплавов) для электрических двигателей серий А2, АО2, 4АС, 5А, АИР были определены предельные размеры износа в зависимости от материала изготовления подшипниковых щитков, которые могут быть восстановлены электрофизическими методами.

**электрофизические методы восстановления, износ деталей, электрические двигатели, электроприводы, электрооборудование, подшипниковые щиты, коэффициент мощности  $\cos\phi$**

**Ф.М. Ерхан**, проф., д-р техн. наук, **Н.И. Корнейчук**, проф., канд. техн. наук  
*Державний аграрний університет Молдови, Кишинів, Молдова*

## Влияние износа подшипниковых щитков на коэффициент мощности электродвигателей переменного тока

У статті приведений аналіз і оцінка складових частин електродвигунів і електричних приводів сільськогосподарських машин і устаткування, які підлягають відновленню і було встановлено, що найбільш зношених частин електродвигунів є підшипникові щити. Виходячи з проведених вимірювань різних типів підшипникових щитків (чавунні і з алюмінієвих сплавів) для електричних двигунів серій А2, АО2, 4АС, 5А, АИР були визначені граничні розміри зносу в залежності від матеріалу виготовлення підшипникових щитків, які можуть бути відновлені електрофізичними методами.

**электрофизические методы восстановления, износ деталей, электрические двигатели, электроприводы, электрооборудование, подшипниковые щиты, коэффициент мощности  $\cos\phi$**

**Постановка проблемы.** В соответствии [1] из всего объема генерируемой электрической энергии на земном шаре около (60-65) % используется различными типами электрических приводов в различных областях.

Одним из узких мест электрических двигателей и электроприводов является износ подшипниковых узлов. Необходимо отметить, что в настоящее время в промышленности, сельском хозяйстве и многих других отраслях народного хозяйства используется широкая гамма электрических двигателей и электроприводов работающих в различных режимах и с различными техническими характеристиками.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Можно отметить, что в настоящее время в мире выпускаются более ста тысяч модификаций подшипников качения [2, 3], которые используются в различных технических установках и электроприводах в промышленности и сельского хозяйства, работающих в различных режимах эксплуатации.

Большое количество вновь выпускаемых подшипников используются для ремонта сельскохозяйственной техники, в том числе и электроприводов как

постоянного, так и переменного тока [4]. Можно утверждать, что неотъемлемой частью электрических двигателей и электроприводов являются шарикоподшипники, номенклатура которых из года в год расширяется. Можно констатировать, что суммарная установленная мощность электроприводов практически каждые 5-7 лет удваивается, а процессы электрификации и автоматизации все больше основываются на электроприводах различных типов и мощностей. Практически все электроприводы, используемые в сельском хозяйстве условно можно разделить на следующие группы:

- электроприводы переменного тока, используемые в электротехнических установках и технологических процессах;

- электроприводы сельскохозяйственных машин (тракторов, комбайн, автотранспортных средств), которые чаще всего постоянного тока.

К первой группе относятся электроприводы переменного тока (как асинхронные, так и синхронные), могут встречаться и электроприводы постоянного тока.

Ко второй группе чаще всего относятся электроприводы сельскохозяйственных машин, и автотракторного оборудования.

Условия эксплуатации электрических приводов и особенно электроприводов сельскохозяйственного назначения самые разнообразные, начиная от агрессивных и влажных сред и заканчивая перепадами температур.

Особенность эксплуатации электрических машин и электрических приводов заключается в их условиях и сезонности выполнения производственных работ. Продолжительность работы электрических приводов зависит от типа технологического процесса и режима работы.

Так в режиме S1 работают около 20% электроприводов установленных в сельском хозяйстве. Характерные режимы S2, S3 и S6 относятся к различным электроприводам сельскохозяйственных машин и оборудования.

Следует отметить, что в зависимости от режима работы электропривода можно установить характер распределения и величину износа посадочных отверстий подшипниковых узлов электрических двигателей и электрооборудования.

Анализ условия эксплуатации электроприводов и электрооборудования различного назначения в области надежности и долговечности эксплуатационных свойств подшипниковых узлов [5] показывают, что износ или несоответствие линейных размеров и геометрической формы посадочных мест нормативным требованиям приводят к нарушению скоординированного расположения деталей электрических двигателей и особенно роторов.

Это несоответствие линейных размеров и геометрической формы посадочных мест подшипников приводит к изменению воздушного зазора между ротором и статором электродвигателей, что приводит к изменению (снижению) коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) и коэффициента полезного действия ( $\eta$ ) не только электродвигателя, но и электропривода в целом.

Анализ технических данных и литературных источников [8] показывают, что информация о величине и форме износа посадочных отверстий под подшипниками качения чаще всего носит вероятностный характер и зависит от условия эксплуатации и режимов работы электроприводов. Величина износа посадочных отверстий под подшипниками качения электроприводов, сельскохозяйственных машин и оборудования зависит от физико-механических свойств материалов используемых для изготовления подшипниковых щитков, длительности и условия эксплуатации. Знание величины и характера расположения износа посадочных отверстий позволяют обосновать выбор способа и материала для их восстановления.

**Постановка задания.** Исходя из вышесказанного, следует, что обнаружение и своевременное устранение дефектов посадочных мест под подшипники качения способствует повышению надежности и долговечности электроприводов и электрооборудования.

**Изложение основного материала.** Проведем анализ состояния подшипниковых щитков. Назначение подшипниковых щитков состоит в том, что они удерживают подшипники, в которых вращается вал с ротором, будучи сами прикреплены к станине. Обычно подшипниковые щиты дифференцируются как задние и передние.

Подшипниковые щиты служат, еще для защиты от попадания в электрический двигатель посторонних предметов или для полной изоляции внутренней части электрического двигателя от окружающей среды.

В соответствии [5] около 8-12% электродвигателей выходит из строя вследствие отказов подшипниковых узлов. Известно, что в современных электродвигателях широко применяются щиты, изготовленные из алюминиевых сплавов (методом литья под давлением). Однако у них меньшая по сравнению с чугунными жесткость, износостойчивость и эксплуатационная надежность. Посадочное гнездо подшипника в таком щите изнашивается довольно быстро.

В процессе эксплуатации электродвигателей в результате перекосов и несоосности подшипниковых щитков, при осевом смещении подшипника, при вибрации ротора, возрастает нагрузка на посадочные места подшипниковых щитков.

Износ посадочных поверхностей происходит неравномерно по окружности, в связи с этим нарушается симметрия положения ротора, что влечет за собой возникновение неравномерности воздушного зазора и как результат возникают подшипниковые токи, которые отрицательно сказываются на характеристиках электродвигателя. Величина износа посадочного места достигает 0,1-0,15 мм и более в зависимости от типа подшипникового щита [1]. В результате этого возникает необходимый технический ремонт для восстановления посадочных мест в подшипниковых щитах электродвигателей.

Однако, при механической обработке алюминиевых щитков возникают дополнительные трудности, связанные с отсутствием установочной базы.

В соответствии с [1,6] предельные износы подшипниковых щитков асинхронных электрических двигателей различных мощностей выполненные из чугуна составляют (0,12-0,19) мм, а для подшипниковых щитков выполненные из алюминиевых сплавов, соответствующий износ составляет (0,12-0,23) мм.

Подавляющее большинство подшипниковых щитков изготавливаются из чугуна или алюминиевых сплавов в виде отливок. Необходимо отметить, что прочность чугуна как конструкционного материала выше, чем у алюминиевых сплавов и оказывается вполне достаточной, а технологическая простота производства и дешевизна сырых материалов способствовали широкому применению чугунных щитков.

Подшипниковые щиты служат соединительной деталью между статором и ротором. В электрических приводах различного назначения применяются различные по конструкции подшипниковые щиты, отличающиеся друг от друга формой, размерами и материалом, из которого они изготовлены.

Но несмотря на большое разнообразие конструкций щитков, по назначению их можно разделить на два вида:

а) подшипниковые щиты для электродвигателей на лапах (рис. 1, а), служащие только соединительной деталью;

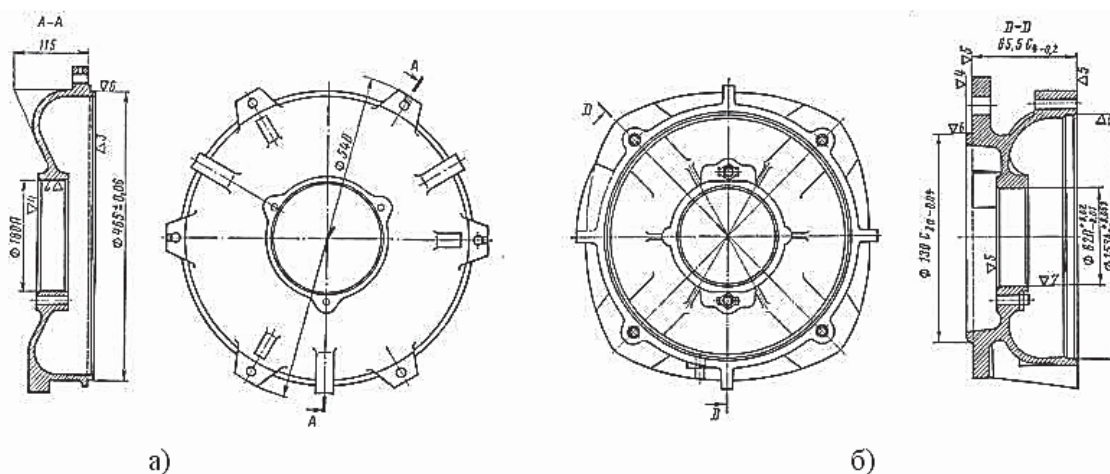
б) фланцевые подшипниковые щиты для электродвигателей без лап (рис. 1, б), которые являются не только соединительной деталью, но и служат для установки и крепления электродвигателя на исполнительном механизме.

Такие подшипниковые щиты в отличие от обычных щитков имеют присоединительный фланец.

Заготовки подшипниковых щитков получают методом литья из чугуна и алюминия (электродвигателей малых габаритов) для асинхронных двигателей и стали для электрических двигателей постоянного тока. В зависимости от, качества изготовления и точности взаимного расположения поверхностей щита зависит долговечность работы подшипников и основные технические и энергетические показатели электрических двигателей.

В связи с этим к подшипниковым щитам предъявляются определенные требования:

- замок и отверстие под подшипник должны быть концентричными, и иметь общую ось;
- у фланцевых подшипниковых щитков с такими поверхностями должна быть концентрична также присоединительная поверхность (заточка фланца, которой электрический двигатель соединяется с рабочей машиной);
- отверстие под подшипник обрабатывается с высокой точностью (1 - 2-й класс) и чистотой поверхности (6 - 8-й класс), которые определяются в зависимости от того, с какого класса подшипниками они сопрягаются.



а - электродвигателя единой серии ;4А 9-го габарита;  
б - фланцевый, электродвигателя АИРС 2-го габарита

Рисунок 1 – Подшипниковые щитки электродвигателей

Источник: [6]

Для проведения микрометража были рассмотрены электрические приводы и электрические двигатели ряда производственных и сельскохозяйственных предприятий, с которыми заключены договоры о научном сотрудничестве.

Результаты проведенных микро метражах ремонтного фонда систем передачи электрических двигателей и электроприводов представлены в табл. (1).

Исходя из проведенных измерений различных типов подшипниковых щитков (чугунные и из алюминиевых сплавов) для электрических двигателей серий А2; АО2; 4АС; 5А; и АИРС можно утверждать, что для подшипниковых щитков выполненные из алюминиевых сплавов этот износ изменяется в пределах (0,10-0,24)

мм, а для подшипниковых щитков выполненные из чугуна соответствующий износ изменяется в пределах (0,10-0,21) мм.

В зависимости от типа подшипниковых щитков, периода эксплуатации и режимов работы электрических двигателей согласно [4] и проведенных измерений и согласно [6] износ посадочных мест подшипниковых щитков электрических двигателей находится в пределах от (0,15 до 0,24) мм для подшипниковых щитков выполненные из алюминиевых сплавов и от (0,15 до 0,20) мм для подшипниковых щитков выполненных из чугуна.

Такие электрические двигатели могут стабильно работать при отклонении напряжения в пределах  $\Delta U = \pm 10\% U_n$  или отклонении частоты в пределах 0,2% от номинальной частоты и одновременных отклонениях напряжения частоты, ограниченных зоной “В” [2].

Продолжительность работы электроприводов в крайних пределах зоны “В” рекомендуется ограничивать.

Электрические двигатели, имеющие сервис фактор ( $\kappa_c = 1,15$ ) могут длительно работать в режиме S1 при отклонении напряжения в пределах  $-10\% \leq \Delta U = +10\% U_n$  и номинальной нагрузке.

Если позволяет конструкция, воздушный зазор измеряют до разборки с каждой стороны электродвигателя в трех-четырёх точках через отверстия в торцах щитков. Среднее значение зазора вычисляют как среднеарифметическую произведенных замеров. Особое внимание обращают на замеры зазоров у асинхронных электродвигателей.

Влияние воздушного зазора посадочных мест подшипников на технические параметры электрических двигателей.

Увеличение воздушного зазора приводит к уменьшению коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) и коэффициента полезного действия ( $\eta$ ) не только электродвигателя, но и электропривода в целом.

Таблица 1 – Размеры, допуски и шероховатость замковых и посадочных поверхностей подшипниковых щитков электрических двигателей подлежащих восстановлению электрофизическими методами

Серия электрического двигателя	Замковая поверхность			Посадочное отверстие		
	Номинальный диаметр, мм	Предельные отклонения, мм	Шероховатость, $R_a$ , мм	Номинальный диаметр, мм	Поле допуска, мм	шероховатость, $R_a$ , мм при ( $t_{20}$ , %)
1	2	3	4	5	6	7
4 AA56	94	+0,054	2,5	32	P7	2,5
4AA63	105	+0,054	2,5	35	P7	$\geq 25\%$
4A71	122	+0,063	2,5	52	P7	$\geq 25\%$
4A80	137	+0,063	2,5	62	P7	$\geq 25\%$
4A90	155	+0,063	2,5	62	P7	$\geq 25\%$
4A100	175	+0,068	2,5	72	P7	$\geq 25\%$
4A112	202	+0,073	2,5	80	P7	2,5



Продолжение таблицы 1

4A132	287	+0,073	2,5	100	P7	≥ 25%
4AАН160	284	+0,084	2,5	110	P7	≥ 25%
4AАН180	325	+0,084	2,5	130	P7	≥ 25%
4AАН200	364	+0,095	2,5	140	P7	≥ 25%
4AАН225	407	+0,095	2,5	150	P7	≥ 25%
4AАН250	455	+0,095	2,5	180	P7	≥ 25%
A2 и AO2	155	+0,04 -0,02	2,5	110	P7	≥ 25%
AO2	192	+0,05 -0,03	2,5	130	P7	≥ 25%
4AC	258	+0,06 -0,03	2,5	140	P7	≥ 25%
4AC	345	±0,027	2,5	150	P7	≥ 25%
4AC	390	+0,05 -0,03	2,5	180	P7	≥ 25%
4AC	390	+0,05 -0,03	2,5	180	P7	≥ 25%
A 2	450	±0,031	2,5	180	P7	≥ 25%
AO2	450	±0,031	2,5	180	P7	≥ 25%
AO2	520	±0,036	2,5	200	P7	≥ 25%
AO2	520	±0,036	2,5	180	P7	≥ 25%
AO 2	180	+0,024 -0,023	2,5	35	P7	≥ 25%
AO 2	218	+0,024 -0,023	2,5	52	P7	≥ 25%
AO 2	258	+0,024 -0,023	2,5	62	P7	≥ 25%
A2	305	+0,063	2,5	62	P7	≥ 25%
1A2	352	+0,068	2,5	72	P7	≥ 25%
A2	305	+0,063	2,5	62	P7	≥ 25%
A2	352	+0,068	2,5	72	P7	≥ 25%
A2	400	+0,073	2,5	80	P7	2,5
A2	465	+0,073	2,5	100	P7	≥ 25%
АОЛ2	134	+0,084	2,5	110	P7	≥ 25%
АОЛ2	153	+0,084	2,5	130	P7	≥ 25%
5A	155	+0,095	2,5	140	P7	≥ 25%
5AM	175	+0,095	2,5	150	P7	≥ 25%
5АСШ	202	+0,095	2,5	180	P7	≥ 25%
6A	287	+0,084	2,5	110	P7	≥ 25%
5АН225М6	284	+0,084	2,5	130	P7	≥ 25%
5АН225М8	325	+0,095	2,5	140	P7	≥ 25%
5A 80	364	+0,095	2,5	150	P7	≥ 25%
АИРС160S4	407	+0,095	2,5	180	P7	≥ 25%

Источник: [6]

В соответствии с ГОСТ 28173 (МЭК 60034-1) [2] стандартные симметричные воздушные зазоры у асинхронных электрических двигателей с вышеперечисленными свойствами в зависимости от мощности и частоты вращения приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Стандартные воздушные зазоры у асинхронных электрических

Частота вращения об/мин	Воздушный зазор, мм; при мощности двигателя, кВт							
	до 0,2	0.2-1,0	1.0-2.5	2.5-5,0	5,0-10,0	10,0-20,0	20,0-50,0	50,0-100,0
3000	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	0,65	0,80	1,00
1500-500	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,65

Источник: [6]

Круговое вращающееся магнитное поле возникает только при симметрии токов, проходящих по статорным обмоткам и при симметричном воздушном зазоре между обмотками статора и ротором.

НС катушек отдельных фаз, при симметричном расположении этих катушек в пространстве и при сдвиге во времени между фазовыми токами, равно пространственному сдвигу между обмотками.

В соответствии с [4] износ подшипниковых щитков электрических двигателей чаще всего неравномерный и зависит от режима работы электрического двигателя и типа подшипникового щитка (алюминиевые сплавы или чугун).

Чаще всего наблюдается износ в соответствии с нереверсивным режимом работы, что соответствует пусковому режиму электродвигателя [9].

Это осевая неравномерность в пределах  $180^{\circ}$  по оси абсцисс или  $180^{\circ}$  по оси ординат [9]. Эпюра форм износа подшипниковых щитков, посадочных мест подшипников роторов электрических двигателей представлено на рис.(2, а, б).

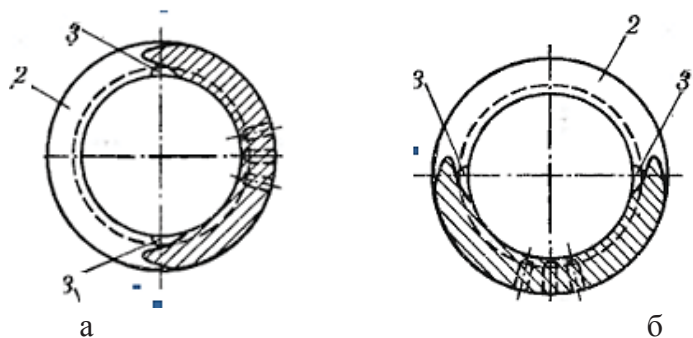


Рисунок 2 – Износ подшипниковых щитков, посадочных мест подшипников роторов электрических двигателей вдоль оси абсцисс (2, а) и вдоль оси ординат (2, б)

Источник: [8]

Из анализа эпюр форм износа подшипниковых щитков, посадочных мест подшипников роторов электрических двигателей вдоль оси абсцисс (рис. 2, а) и вдоль оси ординат (рис. 2, б) и в соответствии с [5] можно утверждать, что соответствующий износ является неравномерным и зависит от режима работы электрического двигателя.

Вышеприведенный износ приводит к тому, что воздушный зазор образует несоответствие линейных размеров и как следствие происходит изменение технических и как следствие и электрических параметров электрических двигателей и электроприводов в целом.

Это несоответствие линейных размеров и геометрической формы посадочных мест подшипников приводит к изменению воздушного зазора между ротором и статором электродвигателей, что приводит к изменению коэффициента мощности ( $\cos\varphi$ ) и коэффициента полезного действия ( $\eta$ ) не только электродвигателя, но и всего электропривода.

Износ подшипниковых узлов чаще всего наблюдается для нереверсивных режимов работы, и в зависимости от ожидаемого пускового режиму работы электродвигателя [9,10].

Чаще всего в результате износа подшипниковых узлов возникает осевая неравномерность в пределах  $90^\circ$  по оси абсцисс и по оси ординат. Этот износ приводит к изменению пространственного расположения ротора электрического двигателя. С изменением пространственного расположения ротора электрического двигателя изменяется форма магнитного потока ( $\Phi$ ) из цилиндрической оно становится эллиптической.

В случае если не соблюдается хотя бы одно из вышеперечисленных условий, то возникает не круговое, а эллиптическое вращающееся магнитное поле, у которого максимальное значение результирующей индукции ( $B$ ) для различных моментов времени ( $t$ ) не остается постоянным, как при круговом цилиндрическом магнитом поле.

В таком поле пространственный вектор намагничивающей силы (НМС)  $\vec{F}_m$  или вектор магнитной индукции  $\vec{B}_m$  описывает эллипс (рис. 3, а). Эллиптическое магнитное поле можно представить в виде двух эквивалентных круговых полей, вращающихся в противоположных направлениях (рис.3 б, в). Разложение эллиптического поля на прямое и обратное круговые поля производится методом симметричных составляющих, с помощью которого определяется  $HC$  прямой и обратной последовательностей.

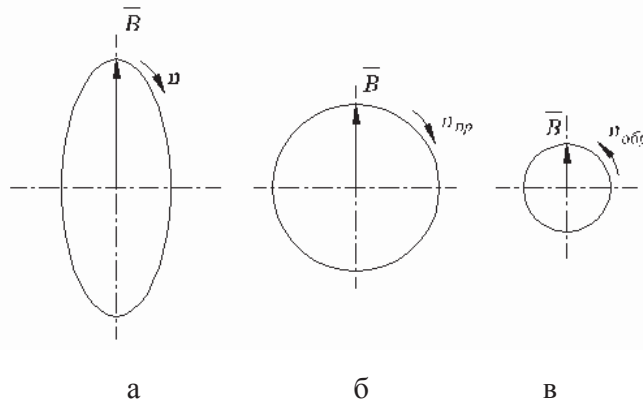


Рисунок 3 – Эллиптическое магнитное поле в рабочем зазоре машины (а) и его разложение на два составляющих круговых поля: прямое (б) и обратное (в)

Источник: разработано авторами

Рассмотрим, как осуществляется это разложение на примере двухфазной обмотки при питании ее синусоидальным током и возникновении несимметричного воздушного зазора из-за износа подшипниковых щитков.

Будем исходить из того, что намагничивающей силе (НМС) фазы  $\vec{F}_B$  (B-Y) отстает от (НМС)  $\vec{F}_A$  фазы (A-X) на заданный угол  $\alpha = -120^\circ = -\frac{2}{3}\pi$ , для таких случаев выполняется уравнение (1)



$$\begin{aligned}\bar{F}_A &= \bar{F}_{m1} \sin \omega t \\ \bar{F}_B &= \bar{F}_{m1} \sin(\omega t - 2\pi / 3)\end{aligned}\quad (1)$$

При этом для общего случая векторы прямой и обратной последовательностей намагничивающих сил  $\bar{F}_{m1}; \bar{F}_{m2}$  не равны между собой  $\bar{F}_{m1} \neq \bar{F}_{m2}$ . Если будут представлены векторы намагничивающих сил каждой из фаз  $\bar{F}_A$  и  $\bar{F}_B$  с учетом прямых и обратных последовательностей, то они будут иметь форму уравнений (2).

$$\begin{aligned}\bar{F}_A &= \bar{F}_{A1} + \bar{F}_{A2} \\ \bar{F}_B &= \bar{F}_{B1} + \bar{F}_{B2}\end{aligned}\quad (2)$$

В таком случае будем исходить из предположения, что значения соответствующих усилий выполняются согласно (3).

$$\begin{aligned}\bar{F}_{A1} &= -j\bar{F}_{B1} \\ \bar{F}_{A2} &= +j\bar{F}_{B2}\end{aligned}\quad (3)$$

Векторы намагничивающих сил каждой из фаз  $\bar{F}_{A1}$  и  $\bar{F}_{B1}$  образуют систему намагничивающих сил прямой последовательности рис.(4 а), причем вектор  $\bar{F}_{A1}$  опережает вектор  $\bar{F}_{B1}$  на угол  $120^\circ$ , векторы намагничивающих сил каждой из фаз обратной последовательности  $\bar{F}_{A2}$  и  $\bar{F}_{B2}$  образуют систему намагничивающих сил обратной последовательности рис.(30 б), причем вектор  $\bar{F}_{A2}$  отстает от вектора  $\bar{F}_{B2}$  на угол  $-120^\circ$ .

Диаграмма разложения векторов намагничивающих сил статорной обмотки на систему векторов прямой (а) и обратной (б) последовательностей, которые образуют систему векторов намагничивающих сил представлены (рис.4, а.б).

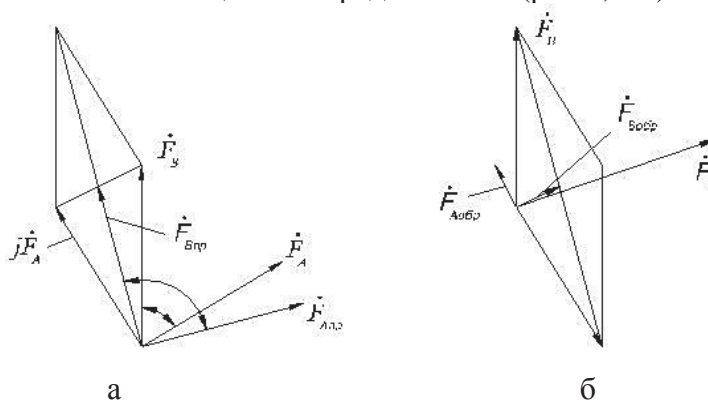


Рисунок 4 – Диаграмма разложения векторов НС статорной обмотки на систему векторов прямой (а) и обратной (б)

Источник: разработано авторами

Величины векторов прямой и обратной последовательностей найдем, подставив последнюю систему в выражения для  $(\bar{F}_A)$  и  $(\bar{F}_B)$  согласно (4).

$$\begin{aligned}\bar{F}_A &= -j\bar{F}_{Anp} + j\bar{F}_{Aobp} \\ \bar{F}_B &= -j\bar{F}_{Bnp} + j\bar{F}_{Bobp}\end{aligned}\quad (4)$$

Умножим первое уравнение системы (4) на  $(j)$  получится (5), из которой следует (6).

$$\begin{aligned} j\bar{F}_A &= \bar{F}_{Anp} - \bar{F}_{Aобр} \\ j\bar{F}_B &= \bar{F}_{Bnp} - \bar{F}_{Bобр} \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку выполняется условие (6), то уравнения бегущей волны для прямого и обратного круговых полей имеют вид (7).

$$\begin{aligned} F_{Bnp} &= F_{Anp} = F_{np} \\ F_{Bобр} &= F_{Aобр} = F_{обр} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_{xnp} &= F_{np} \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi \cdot x}{\tau}\right) \\ F_{xобр} &= F_{обр} \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi \cdot x}{\tau}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

При рассмотрении работы многофазных электрических двигателей и приводов, обычно заданными величинами являются напряжения питания, подводимые к двигателю, и сопротивления фаз, а результирующим параметром является суммарное значение и форма магнитного потока ( $\Phi$ ) в воздушном зазоре двигателя.

Изменение формы суммарного магнитного потока ( $\Phi$ ) в воздушном пространстве между статором и ротором электрических двигателей из цилиндрической в эллиптическую влияет непосредственно на коэффициент мощности электрических двигателей  $\cos\varphi$ , независимо от их типа (постоянного или переменного тока) и приводит к его уменьшению.

Уменьшение коэффициента мощности электрических двигателей  $\cos\varphi$  вызывает ряд негативных последствий, начиная от уменьшения полезной мощности на валу электрического двигателя ( $P_2$ ), механического момента на валу электрического двигателя ( $M$ ), коэффициента полезного действия ( $\eta$ ), до увеличения реактивной мощности в питающей электрической сети ( $Q$ ).

Исходя из величины износа чугунных подшипниковых щитков, посадочных мест подшипников роторов электрических двигателей равным (0,15) и эпюра распределения неровностей износа и распределения усилий приводит к изменению магнитного потока ( $\Phi$ ) на угол  $\varphi' = 6^{\circ}54'$ , что соответствует снижению коэффициента мощности на 0,066, что соответствует изменению коэффициента мощности с  $\cos\varphi = 0,87$ , чему соответствуют угол  $\varphi = 29^{\circ}32'$  до значения

$$\varphi_1 = \varphi + \varphi' = 29^{\circ}32' + 6^{\circ}54' = 36^{\circ}26'$$

Коэффициент мощности при этом  $\cos\varphi_1 = \cos 36^{\circ}26' = 0,804$ .

Таким образом, износ на 0,15мм посадочных мест чугунных подшипников щитков роторов электрических двигателей приводит к снижению коэффициента мощности на 0,066, а это приводит к увеличению реактивной мощности соответствующего двигателя и нагрузки питающей электрической сети.

С увеличением износа подшипниковых щитков роторов электрических двигателей от (0,15 до 0,24)мм эллипсоидную форму суммарного магнитного потока становится более выраженной, что приводит к росту угла сдвига в пределах ( $6^{\circ}54' \leq \varphi \leq 11^{\circ}36'$ ) между электрическими составляющими, а это в свою очередь приводит к снижению коэффициента мощности электрических двигателей и коэффициента полезного действия.

Изменении воздушного зазора у асинхронных электрических двигателей в результате износа подшипниковых щитков приводит к изменению плотности распределения магнитного потока ( $\Phi$ ), форма которого из цилиндрической становится

эллипсоидальной, что вызывает уменьшения коэффициента мощности  $\cos\varphi$ , коэффициента полезного действия ( $\eta$ ) и полезной мощности на валу двигателя ( $P_2$ ).

**Выводы.** В результате выполнения работы можно констатировать, что было произведен анализ и оценка состояния составных частей электрооборудования, электродвигателей и электрических приводов сельскохозяйственных машин и оборудования, подлежащих восстановлению. Было установлено, что наиболее изношенными частями электродвигателей являются подшипниковые щиты, износ, которых является функцией от типа материала из которых изготовлены подшипниковые щиты, режима работы электрического двигателя, типа нагрузки на валу и продолжительности работы.

Если подшипниковые щиты изготовлены из чугуна, то износ находится в пределах (0,10-0,15)мм, а если они изготовлены из алюминиевых сплавов, то износ находится в пределах (0,1-0,23)мм.

Исходя из проведенных измерений различных типов подшипниковых щитков (чугунные и из алюминиевых сплавов) для электрических двигателей серии 4АС были определены предельные размеры износа в зависимости от материала изготовления подшипниковых щитков, которые могут быть восстановлены электрофизическими методами.

## Список литературы

1. Википедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический\\_привод](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_привод) (дата обращения: 17.08.2019)
2. ГОСТ ИЕС 60034-1-2014. Машины электрические вращающиеся. Ч. 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики. Москва: Стандартинформ. 2015. 57 с. (Межгосударственный стандарт). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/600/60014.pdf> (дата обращения: 05.09.2019)
3. Правила устройств электроустановок. Москва: Изд.7. 2013. 486 с.
4. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 1997. 31 с. (Межгосударственный стандарт). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/37/3761.pdf> (дата обращения: 11.09.2019)
5. Информационные материалы ВНИИВИДа. Москва. 2013. 45 с.
6. Мандрыкин С.А. Ремонт электродвигателей. Второе издание, переработанное и дополненное. Москва: Энергоатомиздат. 1983. 88 с.
7. Тетянич И.К., Орлова Л.В. Патент Н02К5/16. Средства для крепления подшипников, например изолирующая опора, средства для установки подшипника в щите (магнитные подшипники Н02К 7/09). опубл. 27.09.1995.
8. Сердешнов А.П. Ремонт электрооборудования в 2-х частях. Минск. 2008. 296 с.
9. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. изд.4. Москва: Юрайт. 2011. 653 с.
10. Материалы НИПТИЭМ. г.Владимир. 2015. 326 с.

## References

1. Vikipedija. *ru.wikipedia.org*. Retrieved from [https://ru.wikipedia.org/wiki/Elektricheskiy\\_privod](https://ru.wikipedia.org/wiki/Elektricheskiy_privod) [in Russian].
2. GOST IES 60034-1-2014. Mashiny jelektricheskie vrashhajushhiesja. Ch. 1. Nominal'nye znachenija parametrov i jekspluatacionnye harakteristiki. Moskva: Standartinform. 2015. 57 s. (Mezhgosudarstvennyj standart). *files.stroyinf.ru*. Retrieved from <https://files.stroyinf.ru/Data/600/60014.pdf> [in Russian].
3. Pravila ustroystv elektroustanovok [Rules for electrical installations] (2013). Moscow: Izd.7. [in Russian].
4. GOST 13109-97. Normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. Moskva: Mezhdunarodnyj sovet po sgandartizazii, metrologii i sertifikacii. 1997. 31 s. (Mezhgosudarstvennyj standart). *files.stroyinf.ru*. Retrieved from <https://files.stroyinf.ru/Data/37/3761.pdf> [in Russian].
5. *Informatsionnyie materialyi VNIIVID [Information materials]* (2013). Moscow [in Russian].
6. Mandryikin, S.A. (1983). *Remont elektrodvigateley [Repair of electric motors. Second edition, revised and supplemented]*. (2d ed.). Moscow: Energoatomizdat [in Russian].

7. Tetyanich, I.K., Orlova, L.V. Patent H02K5/16 (1995). Sredstva dlya krepleniya podshipnikov, naprimer izoliruyuschaya opora, sredstva dlya ustanovki podshipnika v schite (magnitnyie podshipniki H02K 7/09) [Patent H02K5 / 16. Means for mounting bearings, for example an insulating support, means for mounting a bearing in a shield (magnetic bearings H02K 7/09)] [in Russian].
8. Serdeshnov, A.P. (2008). *Remont elektrooborudovaniya v 2-h chastyah* [Repair of electrical equipment in 2 parts.]. Minsk. [in Russian].
9. Kopyilov, I.P. (2011). *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines]. Moscow: Yurayt izd.4 [in Russian].
10. Materialyi NIPTIEM. (2015) [Materials NIPTIEM]. Vladimir [in Russian].

**Tudor Erhan**, Prof., DSc., **Nikolai Korneychuk**, PhD tech. sci., Prof.

*State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Moldova*

### **Influence of Wear of Bearing Shields on ac Power Coefficient of Ac**

The aim of the article is to ensure the reliability and durability of the bearing assemblies of electric motors used in electric drives. The solution to this problem is achieved through the timely elimination of defects in the seats under the rolling bearings in the motor shields.

The article presents the results of determining the dimensions, tolerances and roughness of the castle and landing surfaces of the bearing shields of electric motors to be restored by electrophysical methods. Plots of wear forms of bearing shields, bearing seats of bearings of rotors of electric motors are revealed and it is established that they depend on the operating mode of the electric motor. It was established that with increasing wear of the bearing shields of the rotors of electric motors from 0.15 to 0.24 mm, the ellipsoidal shape of the total magnetic flux becomes more pronounced. This leads to an increase in the angle of shift between the electrical components, which reduces the power factor of electric motors and efficiency. It has been established that the change in the air gap of asynchronous electric motors as a result of wear of the bearing shields leads to the same consequences.

As a result of studies, it was found that the most worn-out elements of electric motors are bearing shields, the wear of which depends on the material from which the bearing shields are made, the operating mode of the electric motor, the type of load on the shaft and the duration of operation. Based on the measurements of various types of bearing shields for electric motors of the 4AC series, the maximum wear sizes were determined, which can be restored by electrophysical methods. It has been established that the maximum wear of cast-iron bearing shields is 0.10-0.15 mm, and that of aluminum - 0.1-0.23 mm.

**electrophysical recovery methods, wear of parts, electric motors, electric drives, electrical equipment, bearing shields, Power factor Cosφ**

*Одержано (Received) 29.11.2019*

*Прорецензовано (Reviewed) 09.12.2019*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2019*

**УДК 631.632.3**

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.116-125>

**Б.І. Котов**, проф., д-р техн. наук

*Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна*

**С.П. Степаненко**, канд.техн.наук, ст. наук. співр.

*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», м.Київ, Україна*

*e-mail:stepanenko\_s@ukr.net*

## **Дослідження руху часток зернового матеріалу у вертикальному каналі пневмогравітаційного класифікатора**

© Б.І. Котов, С.П. Степаненко, 2019