

It is noted that under 800 kg by loading the roller with the right location of the chopping knives, the lowest value of mathematical expectations of the distribution of crushed stem  $\bar{M}[X_4^{np}] = 84,583$  particles is set at 18.6 km / h. This value is 14%, 30%, 40% and 20% less than the speed, respectively, 7.45 km/h, 10.08, 13.6, 22 km/h.

Exceedance of values of mathematical expectations of distributions of particles of stalks at a roller-shredder with the left scheme of an arrangement of knives over the right, for loading of 800 kg, at all speeds investigated is established. The lowest  $\bar{M}[X_4^{np}] = 84,583$  value of mathematical expectation for the right layout of the knives was set at a speed of 18.6 km / h, and for the left -  $\bar{M}[X_3^a] = 101,841$  at a speed of 13.6 km / h. The highest value  $\bar{M}[X_2^a] = 150,929$  of the mathematical expectation of the distribution of parts of sunflower stalks at the left location of the knives is set at a speed of 10.08 km/h, and for the right scheme  $\bar{M}[X_3^{np}] = 118,916$  - at a speed of 13.6 km/h. Exceeding the lowest value of mathematical expectation over the highest within one scheme of placement of knives was - on the left 48%, on the right 41%.

In the roller with the left location of the cutting edge of the knives, with a load of 600 kg in the range of 51–100 mm, the percentage of crushed particles of sunflower stalks exceeded the corresponding values with a load of 800 kg. At speeds of 10.08 km/h, 13.6, 18.6 and 22 km/h, this excess was 1.9 times, 1.44, 1.96 and 1.99 times, respectively.

**shredding of sunflower stalks, plant remains, roller-shredder, indicators of grinding quality**

*Одержано (Received) 24.10.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 09.11.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021*

УДК 621.311.01.064.03

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.88-94>

**Ф.М. Ерхан**, проф., д-р хаб.т.н., **Д.А. Войнеско**, препод.

*Государственный аграрный университет Молдовы, г. Кишинев, Молдова*

*e-mail: terhan@mail.ru*

## Оценка влияния несимметричных режимов на показатели надежности распределительных систем

Распределительные системы электрической энергии обладают большой динамикой развития. Благодаря этому явлению в системах распределения электроэнергии вероятность установки асимметричных режимов монотонно возрастает. В результате этого меняется надежность работы силового электрооборудования, установленного в электрических узлах.

Асимметричные режимы в распределительных системах электрической энергии, сопровождаются очень часто с токами короткого замыкания, которые являются функцией ряда, как определенных, так и неопределенных факторов, которые носят вероятностный характер.

Из этого следует, что исследование влияния асимметричных режимов, сопровождаемых токами короткого замыкания, на надежность распределительных системах электрической энергии, является одной из важнейших задач их развития

Токи короткого замыкания влияют на структурную и функциональную надежность установленного электрооборудования распределительных систем.

**несимметричные режимы, переходные процессы, электроэнергетические системы, функциональная надежность электрооборудования и выключателей, уравнение непрерывности электрической дуги, уравнение сохранения аксиальной проекции импульса, уравнение сохранения энергии импульса**

© Ф.М. Ерхан, Д.А. Войнеско, 2021

**Постановка проблеми.** Несимметричные режимы возникающие в распределительных системах сопровождаются переходными процессами, возникающие в электроэнергетических системах, имеют существенное влияние на функциональную надежность большинства элементов системы и особенно на распределительные устройства и выключателей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для анализа несимметричных режимов и переходных процессов в распределительных сетях исследования проводились на сборных шинах напряжением

$U_H = 10\text{kV}$  трансформаторной подстанции напряжением  $U_H - 110/35/10\text{kV}$ . (Новые Анены) принципиальная однолинейная электрическая схема, которой приведена на рис.1.

Возникающие несимметричные режимы и переходные процессы в узлах ЭЭС являются функцией нескольких составляющих, таких как отключаемые токи, переходное останавливающееся напряжение, параметры возникающей электрической дуги и скорости их изменения во времени.

Перечисленные составляющие, переходных процессов согласно [1-3] могут быть описаны следующими дифференциальными уравнениями:

а) скорость изменения тока в электрической дуге во времени согласно [1] может быть представлено согласно уравнению (1).

$$\frac{di_D}{d\tau} = d(I_m e^{-j\omega\tau}) / d\tau, \quad (1)$$

где  $di_D/d\tau$  – скорость изменения тока электрической дуги;

$I_m$  – амплитудное значение отключаемого тока .

б) скорость изменения напряжения электрической дуге во времени согласно [3] может быть представлено согласно уравнению (2).

$$\frac{du_D}{d\tau} = Z_V \frac{n}{n-1} \frac{di_D}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $du_D/d\tau$  – скорость изменения напряжения электрической дуги.

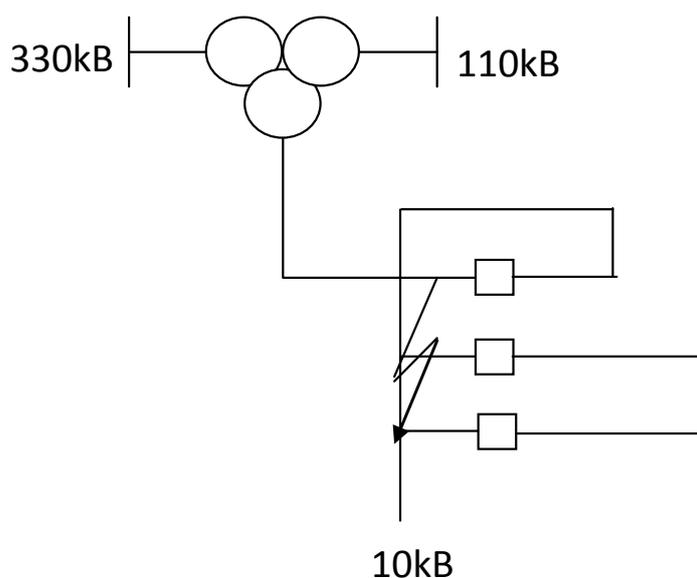


Рисунок 1 – Принципиальная схема исследуемой ТП-110/35/10 кВ

Источник: разработано автором

Электрическая дуга сопровождается выделением определенного количества тепла, значение которого аналитически может быть определена согласно уравнению (3).

$$\frac{dQ}{d\tau} = -Q_0 \left( \frac{1}{i_D^{-1}} \frac{di_D^{-1}}{d\tau} \cdot \frac{1}{U_D} \frac{dU_D}{d\tau} \right) = -Q \left[ \frac{dU_D}{U_D} \cdot \left( \frac{dU_D}{i_D} \right)^{-1} \right] \frac{1}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $dQ/d\tau$  – скорость изменения выделяемого тепла в электрической дуге.

Приведенные дифференциальные уравнения описывающие соответствующие физические процессы являются нелинейными, аналитические решения, которых весьма затруднительны. Для решения уравнений типа (1-3) может быть использован метод Годунова, который согласно [4] позволяет переходить от нелинейных функций и соответствующих дифференциальных уравнениях, которые описывают переходные процессы, к эквивалентным линейным функциям и получить конкретные значения параметров, характеризующих переходные процессы и электрические дуги в распределительных устройствах и выключателях.

Переход такого типа облегчает проведения расчетов переходных процессов, возникающих в распределительных сетях.

Полученные результаты расчетов таким образом переходных процессов и описание электрической дуги в высоковольтных выключателях различного типа, при использовании метода Годунова, показывает их высокую степень точности и соответствие опыту эксплуатации. Это способствует упрощению математической модели и соответствующего описания электрической дуги по сравнению с [1-3]. Все это дает основание считать, что использование метода Годунова [5-8], облегчает проведения соответствующих расчетов и способствует повышению точности расчета параметров переходных процессов в электроэнергетических системах и более детальное и точное определение функциональной надежности установленного электрооборудования (в частности высоковольтных выключателей разного типа) при расчете переходных процессов в электроэнергетических системах. Процесс изменения составных частей эквивалентного значения восстанавливающегося переходного напряжения в точке возникновения переходного процесса приведена на рис.2.

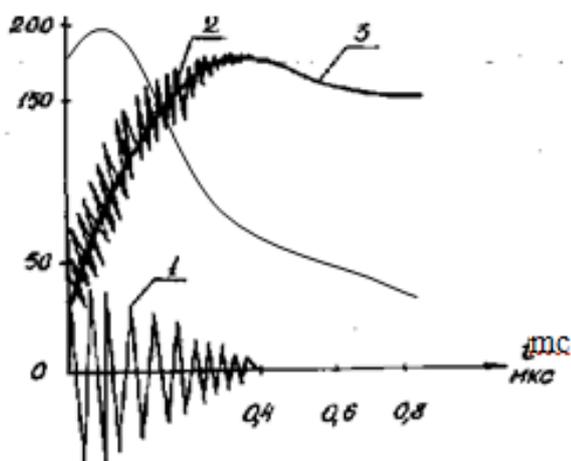


Рисунок 2 – Составные части восстанавливающегося переходного напряжения в точке возникновения переходного процесса и их изменение во времени

Источник: [3]

1. Восстанавливающийся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса со стороны электрической сети;
2. Восстанавливающийся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса со стороны источника питания;
3. Суммарное восстанавливающийся переходное напряжение в точке возникновения переходного процесса.

Переходные процессы, которые возникают в результате несимметричных режимов, могут иметь различные формы и продолжительность [9-12]. Они сопровождаются электрическими дугами, которые возникают при различных видов коротких замыканиях. Задачей настоящих исследований является создание математических моделей для мгновенных значений параметров электрической дуги.

**Изложение основного материала.** Основой для разработки математической модели для мгновенных значений параметров электрической дуги в данном случае являются уравнения непрерывности, сохранения импульса и энергии и закон Ома.

Выше перечисленные уравнения могут быть представлены следующим аналитическими выражениями:

а) уравнение непрерывности электрической дуги имеет форму(4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho v_z) \frac{\partial v_z}{\partial z} + (r \rho v_r) \frac{\partial v_z}{r \partial r} = 0; \quad (4)$$

б) уравнение сохранения аксиальной проекции импульса имеет форму (5):

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} + \rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + \rho v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} = - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} [(\eta + \eta_T) r \frac{\partial v_z}{\partial r}] / r \quad (5)$$

С учетом вышеприведенных условий, уравнение сохранения энергии импульса имеет форму (6):

$$\rho \frac{\partial h_0}{\partial t} + \rho v_z \frac{\partial h_0}{\partial z} + \rho v_r \frac{\partial h_0}{\partial r} = \sigma E^2 - U + \frac{\partial}{\partial r} [(k + k_T) r \frac{\partial T}{\partial r}] / r \quad (6)$$

Если соблюдаются условия, описываемые уравнениями (4-6), то закон Ома может быть представлен в виде (7):

$$I = E \int_0^{r1} 2\pi \sigma r dr = 2 \pi E \int_0^{r1} \sigma r dr, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность среды;

$V_z$  – осевая;

$V_r$  – радиальная компоненты скорости среды;

$\eta$  – вязкость среды;

$\eta_T$  – турбулентная вязкость;

$E$  – напряженность;

$\sigma$  – электропроводность;

$U$  – эффективный коэффициент излучения;

$h_0$  – полная энтальпия;

$k$  – молекулярная теплопроводность;

$k_T$  – турбулентная теплопроводность;

$r$  – радиус дуги.

Если уравнения (4-6) интегрировать по радиусу  $r$  с учетом соблюдения соответствующих пределов  $a \leq r \leq b$  то они получают форму уравнения (8).

а) уравнение непрерывности состояния

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_a^b 2\pi \rho v_z r dr + \frac{\partial}{\partial z} \int_a^b 2\pi \rho v_r r dr + q(b) - q(a) - \lambda(b) + \lambda(a) = 0; \quad (8)$$

б) уравнение сохранения аксиальной проекции импульса примет форму (9)

$$\begin{aligned} \partial \int_a^b 2\pi\rho h_0 r dr / \partial t + \partial \int_a^b 2\pi\rho v_r^2 r dr / \partial z - \Phi(b) + \Phi(a) + q(b)v_z(b) - q(a)v_z(a) = \\ = \partial \rho \pi^2 (b^2 - a^2) / \partial z - 2\pi[bS(b) - aS(a)]. \end{aligned} \quad (9)$$

При этих условиях уравнение сохранения энергии импульса будет иметь форму уравнения (10).

$$\begin{aligned} \partial \int_a^b 2\pi\rho v_z r dr / \partial t + \partial \int_a^b 2\pi\rho v_r h_0 r dr / \partial z - \Psi(b) + \Psi(a) + q(b)h_0(b) - q(a)h_0(a) = \\ = \int_a^b 2\pi[\sigma E^2 - U]dr - 2\pi[W(a) - W(b)]. \end{aligned} \quad (10)$$

В приведенных уравнениях используются следующие обозначения:

$q(a)$ ,  $q(b)$  – потоки массы в радиальном направлении через границу раздела среды  $a$  и  $b$ ;

$\lambda$ ,  $\Phi$ ,  $\Psi$  – функции перемен времени,  $d$ ,  $\rho$ ,  $v_z$ ,  $h_0$  на этих же границах;

$S(a)$ ,  $S(b)$  – функции характеризующие радиальный поток импульса и энергии через границу раздела среды  $r = b$ , которое определяется аналитическими соотношениями (11-14):

$$S(a) = [(\eta + \eta_r) \partial v_z / \partial r]_{r=a}; \quad (11)$$

$$S(b) = [(\eta + \eta_r) \partial v_z / \partial r]_{r=b}; \quad (12)$$

$$W(a) = [(k + k_r) \partial T / \partial r]_{r=a}; \quad (13)$$

$$W(b) = [(k + k_r) \partial T / \partial r]_{r=b}. \quad (14)$$

Приведенные интегральные уравнения (8-10) могут характеризовать переходной процесс, сопровождаемый электрической дугой, возникающей на контактах электрооборудования в зависимости от скорости протекания переходного процесса и месте его нахождения относительно рассматриваемого электрооборудования.

Приведенные нелинейные уравнения, используя метод Годунова, можно линеаризовать и в таком случае переходной процесс и процесс гашения электрической дуги на контактах электрооборудования можно рассматривать при помощи линейных эквивалентных уравнений, в результате чего полученные решения достаточно обоснованно описывают соответствующие явления.

**Выводы.** Использование метод Годунова для анализа несимметричных режимов и переходных процессов, сопровождаемых возникновением электрической дуги на контактах электрооборудования позволяет нелинейные кривые и соответствующие дифференциальные уравнения, которые могут изображать данные процессы линеаризовать по определенным участкам и переходить от дифференциально-интегральных уравнений, которые описывают данный процесс к эквивалентным линейным алгебраическим уравнениям.

Из анализа динамики возникновения несимметричных режимов следует, что наибольшее влияния на функциональную надежность электрооборудования имеет динамика изменения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях.

Динамика изменения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях зависит отряда факторов:

- скорости изменения повторно восстанавливающегося напряжения в точке короткого замыкания со стороны источника питания;
- скорости изменения повторно восстанавливающегося напряжения в точке короткого замыкания со стороны нагрузки;
- величины и скорости изменения мощности в точке короткого замыкания со стороны источника питания;
- величины и скорости изменения мощности в точке короткого замыкания со стороны нагрузки;
- значение эквивалентного сопротивления в точке короткого замыкания.

## Список литературы

1. Ерхан Ф.М. Анализ несимметричных режимов и их влияние на надежность распределительных систем. Вестник ПГУ, 2013 г.
2. Frind G., Rich J. Recovery speed of axial flow gas blast interrupter dependence on pressure and  $di/dt$  in SF – *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*, 1974, vol. 93, № 5, p. 1675-1682.
3. Browne T. Practical modelling of the circuit breaker arc as a short line fault interrupter. *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*, 1978, vol. 97, №3, p. 838-845.
4. Hermann W., Ragaller K. Theoretical description of the current interruption in HV gas blast breakers – *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*, 1977, vol. 96, №5, p. 1546-1552.
5. Годунов С.К. Уравнения математической физики. М.: Наука., 1979. 388 с.
6. Erhan F., Melnic S. Short-circuit current level effect on the electric power systems reliability . *III International Symposium Short Circuit Current in a Power System*. Sulejow, Poland., 1988, т1, стр. 80-89.
7. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 1989. 657 с.
8. Ерхан Ф.М. Использование метода Годунова для оценки переходных процессов в электротехнических устройствах. Энергетика. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2005. (5). С. 52-55.
9. M. Seeger, R. Smeets, J. Yan, H. Ito, M. Claessens, E. Dullni, L. Falkingham, C. Franck, F. Gentils, W. Hartmann, Y. Kieffel, S. Jia, G. Jones, J. Mantilla, S. Pawar, M. Rabie, P. Robin-Jouan, H. Schellekens, J. Spencer, T. Uchii, X. Li, and S. Yanabu. Recent trends in development of high voltage circuit breakers with SF6 alternative gas. *Plasma Physics and Technology*, 4(1):8–12, 2017. doi:10.14311/ppt.2017.1.8.
10. R. Thomas. Controlled switching of high voltage SF6 circuit breakers for fault interruption, 2004. Thesis for the degree of licentiate of engineering. URL: <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/Lic/ThomasRichardLic.pdf>. [4] International standard IEC 62271-100. High-voltage switchgear and controlgear. Part 100. Alternating current circuit-breakers, 2012.
11. T. Morita, M. Iwashita, and Y. Nitta. A theoretical analysis of dynamic arcs and test results of model synchronous air blast circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97(3):940–949, May 1978. doi:10.1109/TPAS.1978.354567.
12. A. Budin, M. Pinchuk, V. Kuznetsov, V. Leontev, and N. Kurakina. An experimental setup for investigation of arc and erosion processes in high-voltage high-current breakers. *Instruments and Experimental Techniques*, 60(6):837–842, Nov 2017. doi:10.1134/S0020441217060033.

## References

1. Erhan, F.M. (2013). *Analiz nesimmetrichnyih rezhimov i ih vliyanie na nadezhnost raspredelitelnyih sistem [Analysis of asymmetric modes and their impact on the reliability of distribution systems]*. Vestnik PGU [in Russian].
2. Frind, G. & Rich, J. (1974). *Recovery speed of axial flow gas blast interrupter dependence on pressure and  $di/dt$  in SF*. *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*
3. Browne, T. (1978). *Practical modelling of the circuit breaker arc as a short line fault interrupter*. *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*
4. Hermann, W. & Ragaller, K. (1977). *Theoretical description of the current interruption in HV gas blast breakers*. *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.*
5. Godunov, S.K. (1979). *Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]*. Moscow: Nauka [in Russian].

6. Erhan, F. & Melnic, S. (1988). *Short-circuit current level effect on the electric power systems reliability*. International Symposium Short- Circuit Current in a Power System. Sulejow, Poland.
7. Neklepaev, B.N. (1989). *Elektricheskaya chast elektrostansiy i podstantsiy [Electrical part of power plants and substations]*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian].
8. Erhan, F.M. (2005). *Ispolzovanie metoda Godunova dlya otsenki perehodnyih protsessov v elektrotehnicheskikh ustroystvah [Using the Godunov method to assess transient processes in electrical devices]*. Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyih zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG. [in Russian].
9. Seeger, M., Smeets, R. & Yan J. et al. (2017). *Recent trends in development of high voltage circuit breakers with SF6 alternative gas*. Plasma Physics and Technology. doi:10.14311/ppt.2017.1.8.
10. Thomas, R. (2012). *Controlled switching of high voltage SF6 circuit breakers for fault interruption, 2004. Thesis for the degree of licentiate of engineering*. <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/Lic/ThomasRichardLic.pdf>. International standard IEC 62271-100. High-voltage switchgear and controlgear.
11. Morita, T., Iwashita, M. & Nitta Y. (1978). *A theoretical analysis of dynamic arcs and test results of model synchronous air blast circuit breakers*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems.
12. Budin, A., Pinchuk, M. & Kuznetsov, V. et al. (2017). *An experimental setup for investigation of arc and erosion processes in high-voltage high-current breakers*. Instruments and Experimental Techniques.

**Fiodor Erhan**, Prof., Dr. habil. tech., **Dinu Voinesco**, Lecturer  
*State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Moldova*

### **Assessing the Influence of Asymmetric Modes on the Reliability Indicators of Distribution Systems**

The power electric distribution systems (PEDS) possess a great dynamics of development. Thanks to this phenomenon in the power electric distribution systems (PEDS) the probability of apparatus of asymmetrical regimes increase monotonously. As a result of this reliability of the functioning of the power electric equipment installed in the electric knots changes. The asymmetrical regimes in the power electric distribution systems (PEDS) accompanied by the short circuit current are a function of a row determinate is a vague factor of probabilistic nature.

Coming from it follows that the investigation of the influence of the asymmetrical regimes accompanied by the current of the short circuit on the reliability of the Power Electric Distribution Systems (PEDS) is one of the most important problems of the development the Power Electric Distribution Systems.

The short circuit currents influence the structural and functional reliability of distribution networks and at the reliability of electrical equipment installation. The dynamics of changes in the levels of short circuit currents in electrical networks depends on the rate of change of the re-recovering voltage at the short circuit point on the power supply side and on the load side, as well as on the magnitude and rate of power change at the short circuit point on the power source side and on the load side.

**current of the short circuit, Asymmetrical regimen, Power electric distribution systems, Reliability of electrotechnical equipment**

*Одержано (Received) 30.10.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 12.11.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021*