



## КРИТЕРИЙ РАСЧЁТА ПОТЕРЬ ОТ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКОВ В ЛИНИИ

### THE CRITERION FOR CALCULATING LOSSES FROM NON-SINUSOIDAL CURRENT IN THE LINE

**Ключевые слова:** критерий потерь, несинусоидальный ток, нелинейная нагрузка.

**Keywords:** loss criterion, non-sinusoidal current, non-linear load.

При работе нелинейных нагрузок в цепи протекают негармонические токи. Такие токи вызывают дополнительные потери электрической энергии, а также ускоренное старение изоляции проводников из-за наличия в их составе высших гармоник. Прежде чем реализовывать мероприятия, направленные на уменьшение негативных эффектов от таких токов, представляется разумным сначала оценить величину потерь энергии от них; разработать и проверить метод расчёта и оценки потерь от несинусоидальных токов в линиях электропередач. Некоторые авторы для оценки потерь предлагают использовать критерий потерь мощности от несинусоидальных токов  $K_{\omega}$ . Разработан критерий расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии  $K_{\omega\Delta PL}$ , который и предлагается к рассмотрению в статье. Для проверки теоретических изысканий критерий расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии был применён к результатам экспериментального исследования, произведённого лично автором на базе учебной лаборатории кафедры электроэнергетики и электрооборудования Санкт-Петербургского государственного аграрного университета в 2017-2019 гг. Практическая проверка формулы, полученной теоретическим путём, показывает, что величины потерь в линии, рассчитанные по уже известному критерию потерь мощности  $K_{\omega}$  и предлагаемому автором критерию расчёта потерь мощности в линии  $K_{\omega\Delta PL}$ , отличаются незначительно. Это позволяет судить о возможности применения последнего для расчёта потерь электроэнергии от несинусоидальных токов в трёхфазных линиях электропередач при одинаковой нагрузке всех фаз.

When operating non-linear loads, non-harmonic currents flow in the circuit. Such currents cause additional losses of electrical energy, and also cause aging of the insulation of the conductors due to the presence of higher harmonics in their composition. Before implementing the measures aimed at reducing the negative effects of such currents, it seems reasonable to first assess the amount of energy loss from them. The research goal was to develop and test a method for calculating and estimating losses from non-sinusoidal currents in power lines. Some authors suggest using the criterion of power losses from non-sinusoidal currents  $K_{\omega}$  to estimate the losses. The author developed a criterion for calculating losses from non-sinusoidal currents in the line  $K_{\omega\Delta PL}$  which is proposed for consideration in this paper. To test theoretical studies, the criterion for calculating losses from non-sinusoidal currents in the line was applied to the results of an experimental study carried out personally by the author on the basis of the educational laboratory of the Department of Electrical Power Engineering and Electrical Equipment of the St. Petersburg State Agricultural University in 2017-2019. Practical verification of the obtained formula shows that the values of line losses calculated according to the already known  $K_{\omega}$  power loss criterion and the criterion for calculating losses from non-sinusoidal currents in the line  $K_{\omega\Delta PL}$  proposed by the author differ only slightly. This allows judging on the possibility of using the  $K_{\omega\Delta PL}$  to calculate the loss of electricity from non-sinusoidal currents in three-phase power lines with the same load of all phases.

**Горбунов Алексей Олегович**, сетевой администратор, ООО "Контел", г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: spbgau@girtab.su.

**Gorbunov Aleksey Olegovich**, network manager, ООО "KonTel", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: spbgau@girtab.su.

При эксплуатации электрических нагрузок, являющихся нелинейными, под воздействием приложенного к ним периодического гармонического напряжения промышленной частоты (50 Гц), в цепи протекают периодические негармонические токи [1, 2]. Примером таких нагрузок

являются газоразрядные лампы, импульсные блоки питания, выпрямительные устройства и др. Исследования, проведённые автором в 2021 г. на базе агрофирмы «Выборжец», расположенной во Всеволожском районе Ленинградской области, это подтверждают (рис. 1).

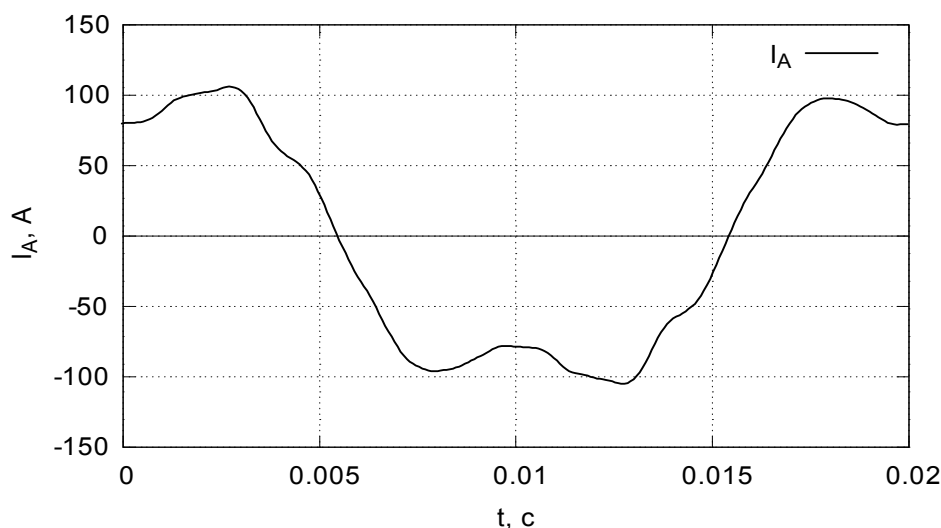


Рис. 1. Кривая тока в фазе "А", измеренная в производственных условиях агрофирмы «Выборжец»

Ток при протекании по проводникам линии электропередачи (ЛЭП) вызывает в них безвозвратные потери энергии (мощности), выделяемые в виде тепла на  $R$  проводника. Однако, в отличие от гармонического тока основной частоты, негармонические токи оказывают также негативное влияние на изоляцию проводника, вызывая её ускоренное старение из-за наличия высших гармонических. Возникает такое негативное явление, как ток в нулевом проводе при равномерной загрузке фаз, достигающий «0,6–0,9 фазного тока» [3]. Кроме того, потребление энергии нагрузкой происходит только на промышленной частоте, в то время как высшие гармонические хотя и присутствуют, но полезной работы по переносу энергии от источника к потребителю не производят, следовательно, потери, вызываемые ими в проводниках ЛЭП, не являются неизбежными и должны быть, по возможности, снижены.

Поскольку периодический негармонический ток является реакцией нагрузки на приложенное к ней воздействие, то характер такой реакции обусловлен, прежде всего, самой нагрузкой, поэтому изменить спектральный состав тока без замены нагрузки, выполняющей ту же самую полезную работу, но обладающей линейной вольтамперной характеристикой, или использования фильтров высших гармонических не представляется возможным.

Предложенные методы являются весьма трудозатратными и капиталоемкими. В связи с этим представляется разумным сначала оценить величину потерь энергии от высших гармонических.

**Цель** исследования – разработать и проверить метод расчёта и оценки потерь от несинусоидальных токов в линиях электропередач.

#### Объекты и методы

Некоторые авторы для оценки потерь предлагают использовать критерий потерь мощности от несинусоидальных токов  $K_{\omega}$  «при симметричной несинусоидальной системе токов от высших гармоник» [4]. Он равен «отношению потерь мощности от несинусоидальных токов  $\Delta P_{\omega}$  к потерям мощности от токов первой гармоники  $\Delta P_1$ » [4]. При практическом же использовании вычислять потери удобно, основываясь на знании суммарных потерь на элементе цепи. Этот параметр легко узнать, вычислив разницу между, например, двумя регистрирующими приборами (счетчиками активной электрической энергии), установленными в начале и в конце интересующего нас участка ЛЭП.

Основываясь на вышеизложенных соображениях, а также принимая во внимание материал статьи [4], мною разработан критерий расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии  $K_{\omega \Delta PL}$ . При разработке этого критерия использовались следующие допущения:

- система напряжений трёхфазного источника питания симметрична;
- нелинейная нагрузка одинакова по своему характеру, равномерно распределена по фазам и не создаёт субгармоник;
- сопротивление  $R$  ЛЭП, на котором происходит безвозвратное преобразование энергии в тепло, одинаково для всех частот до 40-й гармоники включительно [5].

При одинаковой нелинейной нагрузке в фазах трёхфазной электрической сети периодические негармонические токи, продуцируемые такой нагрузкой, будут также одинаковы и сдвинуты друг относительно друга во времени на треть периода. При разложении такого негармонического тока на периоде в ряд Фурье мы получим одинаковую «картинку» разложения в каждой фазе со сдвигом на треть периода основной частоты. В таком случае нетрудно заметить, что первая гармоника (50 Гц) тока образует симметричную систему токов основной частоты, то есть их сумма в любой момент времени равна нулю. Аналогично обстоит дело и со всеми остальными гармониками не кратными трём. Гармоники же кратные трём {3, 6, 9, 12, ...} будут представлены в разложении таким образом, что их начальные углы будут совпадать для каждой фазы сети, таким образом получится, что в любой момент времени сумма, например, третьих гармоник тока всех трёх фаз будет равна утроенному значению этой гармоники в фазе сети в этот момент времени.

Поскольку система токов гармоник кратных трём не симметрична, то единственный путь прохождения для таких токов – это нулевой проводник. Таким образом, у нас есть две системы

трёхфазных токов – симметричная и несимметричная с разными путями их протекания. Для расчёта таких систем давно известен и применяется метод симметричных составляющих [6]. Применим его для вывода формулы улучшенного критерия потерь от несинусоидальных токов в линии  $K_{\omega\Delta PL}$ .

Запишем потери в ЛЭП от гармоник тока кратных 3:

$$\Delta P_{K3} = 3 \cdot R_0 \cdot \sum_{n=1}^{40} I_k^2, \quad (1)$$

где  $R_0$  – сопротивление нулевой последовательности ЛЭП;

$I_k$  – действующее значение тока  $k$ -й гармоники.

Запишем потери в ЛЭП от первой гармоники:

$$\Delta P_1 = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2. \quad (2)$$

Запишем потери в ЛЭП от гармоник не кратных трём за исключением первой:

$$\Delta P_{H3} = 3 \cdot R_1 \cdot \left( \sum_{n=2}^{40} I_n^2 - \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 \right), \quad (3)$$

где  $R_1$  – сопротивление прямой последовательности ЛЭП;

Запишем суммарные потери от высших гармоник как сумму (1) и (3):

$$\begin{aligned} \Delta P_{\omega} &= \Delta P_{K3} + \Delta P_{H3} = 3 \cdot R_0 \cdot \sum_{n=1}^{40} I_k^2 + 3 \cdot R_1 \cdot \left( \sum_{n=2}^{40} I_n^2 - \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 \right) = \\ &= 3 \cdot \left( R_0 \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=2}^{40} I_n^2 - R_1 \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 \right) = 3 \cdot \left( (R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Запишем суммарные потери в линии (от всех гармоник) как сумму (4) и (2):

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{\omega} + \Delta P_1 = 3 \cdot \left( (R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right) + 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = \\ &= 3 \cdot \left( (R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=2}^{40} I_n^2 + R_1 \cdot I_1^2 \right) = 3 \cdot \left( (R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=1}^{40} I_n^2 \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Запишем критерий расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии как отношение суммарных потерь от высших гармоник (4) к суммарным потерям в линии (5):

$$K_{\omega\Delta PL} = \frac{\Delta P_{\omega}}{\Delta P} = \frac{3 \cdot \left( (R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=2}^{40} I_n^2 \right)}{3 \cdot \left( (R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=1}^{40} I_n^2 \right)} = \frac{(R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=2}^{40} I_n^2}{(R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=1}^{40} I_n^2}. \quad (6)$$

В случае присутствия в токе фазы постоянной составляющей выражение (6) примет следующий вид:

$$K_{\omega\Delta PL} = \frac{(R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=2}^{40} I_n^2}{(R_0 - R_1) \cdot \sum_{k=3-n}^{40} I_k^2 + R_1 \cdot \sum_{n=0}^{40} I_n^2} \quad (7)$$

### Экспериментальная часть

Для проверки вышеприведённых теоретических изысканий формула расчёта критерия расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии была применена к результатам экспериментального исследования, произведённого автором лично на базе учебной лаборатории кафедры электроэнергетики и электрооборудования Санкт-Петербургского государственного аграрного университета в 2017-2019 гг. [7]. Ниже приведены экспериментальные и расчётные данные, сведённые в таблицы 1-3, в которых  $P_1$  – измеренная активная мощность в начале линии;

$P_2$  – измеренная активная мощность в конце линии;  $\Delta P = P_1 - \Delta P_2$  – потери активной мощности в линии;  $\Delta PK_{\omega}$  – потери активной мощности в линии от высших гармонических, рассчитанные с использованием критерия потерь мощности от несинусоидальных токов  $K_{\omega}$ ;  $\Delta PK_{\omega\Delta PL}$  – потери активной мощности в линии от высших гармонических, рассчитанные с использованием разработанного автором критерия расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии  $K_{\omega\Delta PL}$ .

### Результаты и обсуждение

Практическая проверка формулы, полученной теоретическим путём, показывает, что величины потерь в линии, рассчитанные по уже известному критерию потерь мощности  $K_{\omega}$  и предлагаемому автором критерию расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии  $K_{\omega\Delta PL}$  отличаются незначительно. Это позволяет судить о возможности применения последнего для расчёта потерь электроэнергии от несинусоидальных токов в трёхфазных линиях электропередач при одинаковой нагрузке всех фаз.

Таблица 1

**Результаты расчёта потерь мощности от несинусоидальных токов в сети 0,38 кВ с трансформатором Y/Un; симметричная нагрузка – лампы VIALOX NAV-E 400W E40; по данным измерений**

Физическая величина	Единицы измерения	Номер опыта			
		1	2	3	4
$P_1$	Вт	3724	7216	13692	19580
$P_2$	Вт	3676	7066	12984	18237
$\Delta P$	Вт	48	150	708	1343
$\Delta PK_{\omega}$	Вт	9,9	6,88	4,9	7,71
$\Delta PK_{\omega\Delta PL}$	Вт	8,237	5,781	5,439	7,994
$K_{\omega\Delta PL}$	о.е.	0,172	0,039	0,008	0,006

Таблица 2

**Результаты расчёта потерь мощности от несинусоидальных токов в сети 0,38 кВ с трансформатором Y/UnCY; симметричная нагрузка – лампы VIALOX NAV-E 400W E40; по данным измерений**

Физическая величина	Единицы измерения	Номер опыта			
		1	2	3	4
$P_1$	Вт	3760	7220	13520	19200
$P_2$	Вт	3716	7066	12960	17870
$\Delta P$	Вт	44	154	560	1330
$\Delta PK_{\omega}$	Вт	10,97	23,71	22,61	28,32
$\Delta PK_{\omega\Delta PL}$	Вт	8,061	18,57	19,475	29,603
$K_{\omega\Delta PL}$	о. е.	0,183	0,121	0,035	0,022

**Результаты расчёта потерь мощности от несинусоидальных токов в сети 0,38 кВ с трансформатором Y/Zn; симметричная нагрузка – лампы VIALOX NAV-E 400W E40; по данным измерений**

Физическая величина	Единицы измерения	Номер опыта			
		1	2	3	4
$P_1$	Вт	3804	7266	13800	19665
$P_2$	Вт	3775	7060	13072	18300
$\Delta P$	Вт	29	206	728	1365
$\Delta PK_{\omega}$	Вт	13,13	43,65	65,42	67,48
$\Delta PK_{\omega\Delta PL}$	Вт	6,136	41,923	68,034	67,677
$K_{\omega\Delta PL}$	о. е.	0,212	0,204	0,093	0,05

Следует также отметить, что численное значение улучшенного критерия потерь  $K_{\omega\Delta PL}$ , предложенного автором, находится в диапазоне от нуля до единицы. При  $K_{\omega\Delta PL}=0$  наблюдается полное отсутствие потерь от высших гармонических, т.е. форма кривой тока синусоидальна. С ростом значения критерия потери от высших гармонических возрастают, значение  $K_{\omega\Delta PL}=1$  в реальных сетях практически недостижимо.

Этим  $K_{\omega\Delta PL}$  выгодно отличается от  $K_{\omega}$ , так как диапазон значений последнего простирается от нуля до бесконечности, что не позволяет, зная только его численное значение, качественно оценить долю потерь от высших гармонических.

### Выводы

1. Получена формула критерия расчёта потерь от несинусоидальных токов в линии  $K_{\omega\Delta PL}$ .

2. Проверено, что расчёт потерь от несинусоидальных токов в линиях электропередач с использованием  $K_{\omega\Delta PL}$  позволяет количественно и качественно оценивать потери от несинусоидальных токов в 3-фазных линиях электропередач.

### Библиографический список

1. Каминский, Е. А. Звезда, треугольник, зигзаг / Е. А. Каминский. – 5-е изд., перераб. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.: ил. – (Б-ка электромонтёра; Вып. 556). – Текст: непосредственный.

2. Минин, Г. П. Несинусоидальные токи и их измерение. – Москва: Энергия, 1979. – 112 с.: ил. – (Б-ка электромонтёра; Вып. 496).

3. Косоухов, Ф. Д. Снижение потерь мощности от несинусоидальных токов в сельских электрических сетях 0,38 кВ / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, А. О. Горбунов. – DOI

10.24411/2078-1318-2019-12125. – Текст: электронный // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 2 (55). – С. 125-135.

4. Косоухов, Ф. Д. Новые научные направления в энергосбережении в трёхфазных трансформаторах и четырёхпроводных линиях при несимметричной, нелинейной и реактивной нагрузках / Ф. Д. Косоухов, Н. В. Васильев, Е. С. Кузнецова. – Текст: непосредственный // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 2 (47). – С. 300-309.

5. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Межгосударственный стандарт. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 19 с. – Текст: непосредственный.

6. Fortescue, C. L. (1918). Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks. *AIEE Trans. Part II. Vol. 37:* 1027-1140.

7. Горбунов, А. О. Исследование потерь мощности от несинусоидальных токов в сельских электрических сетях 0,38 кВ / А. О. Горбунов. – Текст: электронный // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2019. – № 2. – URL: [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/2/st\\_236.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/2/st_236.doc).

### References

1. Kaminskiy, E. A. Zvezda, treugolnik, zigzag / E. A. Kaminskiy. – 5-e izd., pererab. – Moskva: Energoatomizdat, 1984. – 104 s., il. – (B-ka elektromontera; Vyp. 556). – Tekst: neposredstvennyy.

2. Minin, G. P. Nesinusoidalnye toki i ikh izmerenie. – Moskva: Energiya, 1979. – 112 s., il. – (B-ka elektromontera; Vyp. 496).



3. Kosoukhov, F. D. Snizhenie poter moshchnosti ot nesinusoidalnykh tokov v selskikh elektricheskikh setyakh 0,38 kV / F. D. Kosoukhov, N. V. Vasilev, A. O. Gorbunov. – DOI 10.24411/2078-1318-2019-12125. – Tekst: elektronnyy // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – No. 2 (55). – С. 125-135.

4. Kosoukhov, F. D. Novye nauchnye napravleniya v energosberezhении v trekhfaznykh transformatorakh i chetyrekhprovodnykh liniyakh pri nesimmetrichnoy, nelineynoy i reaktivnoy nagruzkakh / F. D. Kosoukhov, N. V. Vasilev, E. S. Kuznetsova. – Tekst: neposredstvennyy // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 2 (47). – С. 300-309.

5. GOST 32144-2013 Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. Mezhhgosudarstvennyy standart. – Moskva: Standartinform, 2014. – 19 s. – Tekst: neposredstvennyy.

6. Fortescue, C. L. (1918). Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks. *AIEE Trans.* Part II. Vol. 37: 1027-1140.

7. Gorbunov, A. O. Issledovanie poter moshchnosti ot nesinusoidalnykh tokov v selskikh elektricheskikh setyakh 0,38 kV / A. O. Gorbunov. – Tekst: elektronnyy // AgroEkoInfo: Elektronnyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal. – 2019. – No. 2. – URL: [http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/2/st\\_236.doc](http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/2/st_236.doc).



УДК 621.311

И.В. Наумов, М.Н. Полковская  
I.V. Naumov, M.N. Polkovskaya

## АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОБЛКОММУНЭНЕРГО ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ В 2019 ГОДУ

### THE ANALYSIS OF THE OPERATION OF ELECTRIC NETWORKS OF THE OBLKOMMUNENERGO OF THE IRKUTSK REGION IN 2019

**Ключевые слова:** отказы, время перерыва электроснабжения, недоотпуск электроэнергии, старение и износ оборудования.

Дан анализ работы электрических распределительных сетей десяти филиалов Облкоммунэнерго Иркутской области в 2019 г. В качестве примера рассмотрены причины аварийных отключений в странах ЕС и России. При исследовании использованы месячные данные об отказах оборудования на электрических сетях и их последствиях по 10 филиалам Облкоммунэнерго за 2019 г. Составлены алгоритмы и компьютерная программа для графического редактора Matlab, с помощью которых построены временные диаграммы изменения количества отказов, времени перерывов и величины недоотпуска электроэнергии для каждого месяца года. Помимо этого выявлены причины аварийных отключений, основными из которых являются нарушения в сетях потребителей, повреждение изоляторов, проводов, разрядников, опор воздушных линий электропередачи; ветровая нагрузка, снег, гололед, перекрытие изоляции и другие. Наибольшее число повреждений зафиксировано в Ангарском, Иркутском, Нижне-Удинском и Саянском филиалах. Кроме того, определены месяцы года, в которых происходит наиболее высокая повреждаемость и ее причины. В

частности, в июле большое число аварий было связано с влиянием природно-климатических факторов: сильного ветра, ливней, наводнений. Причинами аварий, связанных с природным воздействием, стали: падение деревьев, разрушение изоляторов, короткие замыкания, в том числе на подключенных к сетям областного предприятия частных линиях, а также аварии на сетях компаний-партнёров, от которых Облкоммунэнерго получает электроэнергию в свои сети. Рассмотрен износ электрических сетей, а также выполнение плана ремонта основного оборудования. Проанализирован уровень надежности по установленным показателям, рассмотрены основные причины отказа оборудования. Представлены характеристики по совершенствованию функционирования рассматриваемых электрических сетей.

**Keywords:** failures, power supply interruption time, power undersupply, equipment aging and wear.

The paper deals with the analysis of the operation of electric distribution networks of ten branches of the company Oblkommunenergo of the Irkutsk Region in 2019. As an example, the reasons for emergency shutdowns in the EU and Russia are considered. The study used monthly data on equipment failures on electric networks and their