

догрева мазута перед распылением // Теплоэнергетика. 1978. № 9. С. 51–53.

3. Пелешок А. Г., Синякович Б. Г. К вопросу о высоко-температурном подогреве мазута перед сжиганием // Теплоэнергетика. 1981. № 3. С. 109–115.

4. Глухов Б. Ф., Белосельский Б. С. Некоторые особенности распыления высокоподогретого мазута // Теплоэнергетика. 1986. № 9. С. 36–39.

5. Глухов Б. Ф. Эксплуатационные исследования сжигания мазута в котле ТП-35У // Сб. трудов ЛИСИ. Л., 1984. С. 101–105.

6. Cz. X. Szargut Ian, Koziot Ioachim, Majza Eugeniusz Analiza mozliwosci zmniejszenia zuzycia paliwa w piecach grzejnych // Gosp. paliw. i energy. 1986. Vol. 34, No. 4. P. 9–13.

7. Coombs M., M. Strumpf D, Kotchic R. [et al.]. A high-temperature flue gas heat recovery system // Gas Wdrme International. 1983. No. 7/8. P. 292–296.

8. Kohnken K. H. Energy Conservation-vital in todays comprtitive international to increase thermal efficiency // Industrial Heating. 1983. No. 7. P. 17–19.

9. Irretier Olaf. Resource savings and energy efficiency in heat treatment shops // Heat Process. 2014. Vol. 12, No. 1. P. 47–52.

10. Stumpp Hermann. Energy and global natural resources – from the point of the Furnace Industry // Heat Process. 2013. Vol. 11, No. 1. P. 92–93.

11. Бакластов А. М. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок. М.: Энергия, 1970. 568 с.

**ПАРАМОНОВ Александр Михайлович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: amparamonov@mail.ru

#### Для цитирования

Парамонов А. М. Повышение эффективности сжигания мазута в нагревательных печах кузнечного и термического производства // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 28–31. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-28-31.

Статья поступила в редакцию 15.11.2017 г.

© А. М. Парамонов

УДК 621.316.3

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-31-35

**С. С. ГИРШИН**  
**Ч. П. МОНГУШ**  
**С. В. БИРЮКОВ**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## РАСЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОМ ЗАДАНИИ НАГРУЗОК

В статье рассмотрена задача расчета потерь активной мощности в линии электропередачи при вероятностном задании нагрузок с учетом температурной зависимости сопротивления. Предложена расчетная формула для потерь мощности, построены и проанализированы зависимости потерь мощности от тока в детерминированной форме и математического ожидания потерь мощности от математического ожидания тока. В результате анализа приведенных зависимостей выявлено, что расчет потерь мощности в вероятностной форме при использовании распределения Релея дает наилучшие результаты для не очень больших токов. При токах, близких к допустимому, начинает сказываться влияние области кривой распределения, где невозможно установление теплового равновесия.

**Ключевые слова:** потери мощности, потери электроэнергии, вероятностно-статистические методы, закон Рэлея, математическое ожидание, среднеквадратичный ток.

**Введение.** Проблема потерь электроэнергии во всем мире стоит очень остро. В 2016 году потери энергии в сетях ПАО «ФСК ЕЭС» (Публичное акционерное общество «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы») из 540,534 млрд кВт·ч сальдированного отпуска из сети составили 25,033 млрд кВт·ч (по уровню напряжения 330 кВ и выше 16,173 млрд кВт·ч,

220 кВ и ниже — 8,86 млрд кВт·ч (4,63 %) [1]. Потери энергии по регионам страны и по филиалам ПАО «МРСК Сибири» (Публичное акционерное общество «Межрегиональная распределительная сетевая компания Сибири») приведены в табл. 1, 2 [2].

По вышеприведенным данным можно отметить, что большинство отчетных потерь не соответствует уровню, установленному Энергетической стратегией

Потери электроэнергии в МРСК в 2016 году

Наименование межрегиональных распределительных сетевых компаний	Фактические (отчетные) потери электроэнергии в сети	
	млрд кВт·ч	%
ПАО «МРСК Урала»	5,336556	7,84
ПАО «МРСК Центра»	6,011200	10,54
ПАО «МРСК Центра и Приволжья»	4,843000	8,97
ПАО «МРСК Северного Кавказа»	1,972176	16,16
ПАО «МРСК Северо-Запада»	2,484763	6,63
ПАО «МРСК «Юга»	2,915387	11,19

Таблица 2

Уровень потерь электроэнергии в филиалах ПАО «МРСК Сибири» в 2016 году

№	Наименование филиала МРСК Сибири	Отпуск электрической энергии в сеть	Отпуск электрической энергии из сети	Фактические (отчетные) потери электроэнергии	
		млн кВт·ч	млн кВт·ч	млн кВт·ч	%*
1	Алтайэнерго	7 627,860	7 051,850	576,010	7,55
2	Бурятэнерго	4 410,150	4 101,100	309,050	7,01
3	ГАЗС	539,970	449,010	90,960	16,84
4	Красноярскэнерго	14 406,960	12 491,960	1 914,990	13,29
5	Кузбассэнерго-РЭС	16 310,000	15 588,760	721,240	4,42
6	Омскэнерго	8 531,140	7 912,680	618,460	7,25
7	Хакасэнерго	11 670,020	11 419,870	250,150	2,14
8	Читаэнерго	6 476,288	5 585,819	652,633	10,08
9	ДЗО «Тываэнерго»	713,338	436,073	277,265	38,87

\* В процентах от отпуска электрической энергии в сеть

России до 2030 года: 2016–2020 гг. — не более 10 %, 2021–2030 гг. — не более 8 % [3]. Увеличение потерь вынуждает энергоснабжающие организации работать в убытке и приводит к росту тарифа на электроэнергию для конечных потребителей.

Важнейшим направлением работ в сфере электроэнергетики является уменьшение потерь в электрических сетях [4–7]. В связи со сложностью расчета потерь и наличием существенных погрешностей в последнее время актуальным является совершенствование методов расчета потерь электроэнергии с целью повышения достоверности результатов.

В настоящее время при расчете потерь энергии в электрических сетях все чаще учитывается тем-

пературная зависимость активных сопротивлений [8–12]. В источнике [8] указано, что «данный подход связан с вычислением температур элементов сети на основе уравнений теплового баланса. Эти уравнения в большинстве случаев нелинейны и для их решения могут быть использованы различные методы». Целью данной работы является расчет потерь мощности при вероятностном задании нагрузок с учетом температурной зависимости активных сопротивлений.

**1. Потери мощности в детерминированной форме.** Рассмотрим воздушную линию электропередачи в симметричном стационарном режиме. Потери мощности с учетом температурной зависимости активного сопротивления [4]

$$\Delta P = 3(I^2 R_0 + \alpha I^2 R_0 \theta_{\Pi}), \quad (1)$$

где  $I$  — ток, протекающий в проводе воздушной линии и заданный в дальнейших выкладках как случайная величина;  $R_0$  — активное сопротивление провода при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления;  $\theta_{\Pi}$  — температура провода.

Уравнение теплового баланса проводника в простейшем случае имеет вид:

$$\Delta P = \frac{\theta_{\Pi} - \theta_{\text{ОКР}}}{S}, \quad (2)$$

где  $\theta_{\text{ОКР}}$  — температура окружающей среды;  $S$  — тепловое сопротивление между воздушной линией и окружающей средой.

Исключив температуру провода из (1) с помощью уравнений (1) и (2), после преобразований получим следующую формулу для потерь мощности с учетом температурной зависимости сопротивления:

$$\Delta P(I) = \frac{1 + \alpha \theta_{\text{ОКР}}}{\alpha \cdot S} \left( \frac{1}{1 - 3\alpha \cdot I^2 R_0 S} - 1 \right). \quad (3)$$

## 2. Потери мощности в вероятностной форме.

Параметры режима электрической сети (ток, напряжение, активная и реактивная мощности, а также показатели качества электроэнергии) можно рассматривать как случайные величины. Без учета температуры потери мощности пропорциональны квадрату тока. Следовательно, математическое ожидание потерь мощности полностью определяется двумя числовыми характеристиками распределения тока: математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением. В качестве расчетной величины здесь и далее рассматривается только математическое ожидание потерь мощности. Расчет дисперсии потерь мощности не имеет большого практического значения, так как при вычислении потерь энергии за достаточно большой промежуток времени положительные и отрицательные отклонения потерь мощности от среднего взаимно компенсируются.

С учетом температуры потери мощности представляют собой более сложную функцию тока (3). В этом случае отдельных числовых характеристик распределения тока для вычисления математического ожидания потерь недостаточно; требуется знать закон распределения действующего значения тока.

Закон распределения тока в каждом конкретном случае можно определить на основе обработки статистических данных. Вместе с тем распределение действующего значения тока должно обладать также некоторыми общими свойствами.

1. Это распределение несимметрично, так как все значения от нуля до тока в режиме максимальных нагрузок достаточно вероятны, но при дальнейшем увеличении тока вероятность резко снижается.

2. Действующее значение тока не может быть отрицательным.

Одним из наиболее простых распределений, учитывающих эти особенности, является закон Релея, свойственный электрическому току [13, 14]:

$$f(I) = \frac{I}{\sigma^2} e^{-\frac{I^2}{2\sigma^2}} = \frac{\pi I}{2m_I^2} e^{-\frac{\pi I^2}{4m_I^2}}, \quad (4)$$

где  $\sigma$  и  $m_I$  — среднеквадратическое отклонение и математическое ожидание тока, связанные соотношением

$$m_I = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}. \quad (5)$$

Математическое ожидание функции  $\varphi(x)$  непрерывной случайной величины  $x$  определяется интегралом [15]:

$$M[\varphi(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) f(x) dx, \quad (6)$$

где  $f(x)$  — плотность распределения величины  $x$ .

Подставляя (3) и (4) в (6), получим интегральное выражение для потерь активной мощности:

$$m_{\Delta P} = \int_0^{+\infty} \left[ \frac{1 + \alpha \theta_{\text{ОКР}}}{\alpha \cdot S} \left( \frac{1}{1 - 3\alpha \cdot I^2 R_0 S} - 1 \right) \right] \left[ \frac{\pi I}{2m_I^2} \cdot e^{-\frac{\pi I^2}{4m_I^2}} \right] dI. \quad (7)$$

Путем интегрирования и преобразований получим окончательное выражение для математического ожидания потерь мощности:

$$m_{\Delta P} = \frac{1 + \alpha \theta_{\text{ОКР}}}{\alpha \cdot S} \left( B e^{-B} \int_{-\infty}^B \frac{e^Z}{Z} dZ - 1 \right) = \frac{1 + \alpha \theta_{\text{ОКР}}}{\alpha \cdot S} (B e^{-B} Ei^*(B) - 1), \quad (8)$$

где  $B = \frac{\pi}{12\alpha R_0 S m_I^2}$ ;  $Ei^*(B)$  — интегральная показательная функция, значения которой при  $B = 0,01 \dots 15$  определяются по специальным таблицам [16], а при  $B > 15$  — по приближенной формуле

$$Ei^*(B) \approx \frac{e^B}{B} \cdot \left( 1 + \frac{1!}{B} + \frac{2!}{B^2} + \frac{3!}{B^3} + \dots \right). \quad (9)$$

**3. Сравнение результатов.** Для анализа полученных результатов были построены три графика:

1. Зависимость математического ожидания потерь мощности от математического ожидания тока по формуле (8).

2. Зависимость потерь мощности от тока (среднего) по детерминированной формуле (3).

3. Зависимость потерь мощности от среднеквадратичного тока по той же формуле, причем связь среднеквадратичного и среднего токов соответствует закону Релея:

$$I_{\text{ср.кв.}} = I_{\text{ср}} \sqrt{\frac{2}{\pi} + 1}. \quad (10)$$

В качестве объекта вычислений выбран провод марки СИП 2 3х95 + 1х95 с исходными данными, приведенными в табл. 3.

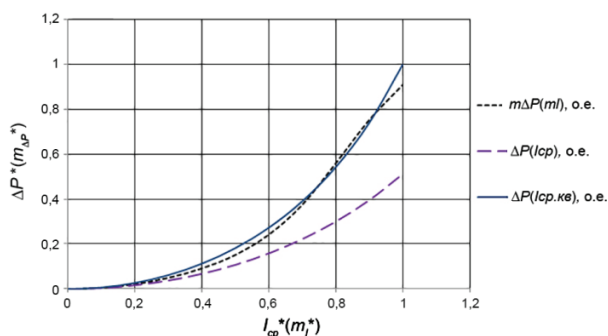
Тепловое сопротивление было рассчитано по уравнению теплового баланса в режиме допустимого тока:

$$S = \frac{\theta_{\text{АОП}} - \theta_{\text{ОКР}}}{3I_{\text{АОП}}^2 R_0 (1 + \alpha \theta_{\text{АОП}})} = 0,0005884 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Таблица 3

## Исходные данные для сравнительных расчетов

Наименование и обозначение параметра	Численное значение
Температура окружающей среды $\Theta_{окр}$	25 °С
Допустимая температура провода $\Theta_{гон}$	90 °С
Допустимый ток $I_{гон}$ [17]	300 А
Активное сопротивление $R_0$ [18]	0,295 Ом/км
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$	0,0043 °С <sup>-1</sup>

Рис. 1. Графики зависимостей  $\Delta P(I_{cp})$ ,  $m_{\Delta P}(m_l)$ ,  $\Delta P(I_{cp}, кв)$  в относительных единицах

Зависимости построены в пределах изменения среднего тока (математического ожидания тока) от 0 до 300 А. При этом использована следующая система относительных единиц:

$$m_{\Delta P}^* = m_{\Delta P} / \Delta P_{max} \quad \Delta P^* = \Delta P / \Delta P_{max}$$

$$m_I^* = m_I / I_{гон} \quad I_{cp}^* = I_{cp} / I_{гон}$$

где  $\Delta P_{max}$  — максимум потерь мощности для всех трех графиков.

Графики вышеуказанных зависимостей представлены на рис. 1.

Анализируя полученные графики зависимостей, можно сделать следующие выводы:

1. Расчет потерь по среднеквадратичному току и по вероятностной формуле (8) дают довольно близкие результаты. Однако формы кривых и, следовательно, закономерности изменения потерь при изменении тока несколько различаются. Потери по вероятностной формуле возрастают сначала медленнее, а потом быстрее, чем при расчете по среднеквадратичному току. При токе выше 0,92 о.е. рост потерь по вероятностной формуле вновь замедляется.

2. Зависимость потерь мощности от среднего тока по детерминированной формуле сильно отличается от двух других зависимостей. Это позволяет утверждать, что расчет по среднему току дает заведомо наихудшие результаты, занижая потери мощности.

3. Из формулы (3) видно, что при достаточных больших токах потери будут формально отрицательные. Фактически это означает, что установившийся тепловой режим при таких токах не существует.

Замедление роста потерь по вероятностной формуле при токе выше 0,92 о.е. объясняется именно влиянием области больших токов, которой соответствуют формально отрицательные потери. Поэтому можно утверждать, что вероятностная формула в рассмотренном виде дает наилучшие результаты для не очень больших токов; при приближении среднего тока к допустимому наибольшую точность обеспечивает расчет потерь по среднеквадратичному току. Однако следует заметить, что если средний ток близок к допустимому, то фактически это значит, что часть времени линия будет работать с перегрузкой, чего не должно быть в нормальном режиме, для которого производятся расчеты потерь.

4. Чтобы исключить влияние области «отрицательных» потерь, можно ограничить область определения функции распределения некоторым максимальным током. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

## Библиографический список

1. ПАО «ФСК ЕЭС». URL: <http://www.fsk-ees.ru> (дата обращения: 30.04.2017).
2. МРСК Сибири — Филиалы. URL: [http://www.mrsk-sib.ru/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=552&Itemid=3360&lang=ru55](http://www.mrsk-sib.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=552&Itemid=3360&lang=ru55) (дата обращения: 30.04.2017).
3. Об энергетической стратегии России на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г., № 1715-р. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
4. Гиршин С. С., Бубенчиков А. А., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры // Омский научный вестник. 2009. № 3 (83). С. 176 – 179.
5. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Бубенчиков А. А. [и др.]. Уточнение метода расчета температуры провода при постоянной нагрузке с учетом климатических факторов. Омск, 2010. 23 с. Деп. в ВИНТИ РАН 08.04.10, № 198-B2010.
6. Шведов Г. В., Азаров А. Н. Оценка влияния метеословий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий // Электричество. 2016. № 2. С. 11 – 18.
7. Воронницкий В. Э. Снижение потерь электроэнергии — важнейший путь энергосбережения в электрических сетях // Энергосбережение. 2014. № 3. С. 61 – 64.
8. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Кузнецов Е. А. Карпенко А. В. Упрощение уравнений теплового баланса воздушных линий электропередачи в задачах расчета потерь энергии // Омский научный вестник. 2013. № 1 (117). С. 148 – 151.
9. Герасименко А. А., Тимофеев Г. С., Тихонович А. В. Учет схемно-режимных и атмосферных факторов при расчете технических потерь электроэнергии в распределительных сетях // Журнал Сибирского федерального университета. 2008. № 1 (2). С. 188 – 206.
10. Зарудский Г. К., Шведов Г. В., Азаров А. Н., Самалюк Ю. С. Оценка влияния метеорологических условий на активное сопротивление проводов воздушных линий электропередачи // Вестник МЭИ. 2014. № 3. С. 35 – 39.
11. Бурчевский В. А., Бубенчиков А. А., Горюнов В. Н., Гиршин С. С., Петров А. С., Петрова Е. В., Сафонов Д. Г. Коррекция технологических потерь электрической энергии ВЛ 35 кВ электрических сетей ООО «Роснефть-Юганскнефтегаз» на основе учета климатических и режимных // Омский научный вестник. 2010. № 1 (87). С. 127 – 132.
12. Бигун А. Я., Гиршин С. С., Петрова Е. В., Горюнов В. Н. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 212.

13. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. М.: Энергия, 1965. 892 с. ISBN 978-5-458-49059-7.

14. Mahmoud M. A. W., Ghazal M. G. M. Estimations from the exponentiated Rayleigh distribution based on generalized Type-II hybrid censored data // Journal of the Egyptian Mathematical Society. 2017. Vol. 25, Issue 1. P. 71–78. DOI: 10.1016/j.joems.2016.06.008.

15. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 7-е изд. стер. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.

16. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф., Специальные функции: формулы, графики, таблицы: пер. с 6-го перераб. нем. изд. / под ред. Л. И. Седова. 3-е изд. М.: Наука, 1977. 342 с.

17. ГОСТ 31946–2012. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Общие технические условия. Введ. 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.

18. ГОСТ 22483–2012 (IEC 30228:2004). Межгосударственный стандарт. Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров (с поправкой). Введ. 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.

**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**МОНГУШ Чайна Павловна**, аспирантка кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**БИРЮКОВ Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика».

Адрес для переписки: 99mongush99@mail.ru

#### Для цитирования

Гиршин С. С., Монгуш Ч. П., Бирюков С. В. Расчет потерь мощности в электрических сетях при вероятностном задании нагрузок // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 31–35. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-31-35.

Статья поступила в редакцию 26.12.2017 г.

С. С. Гиршин, Ч. П. Монгуш, С. В. Бирюков

УДК 621.318.4

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-35-39

**А. Д. ЭРНСТ  
К. А. ПЕТРОВ  
Е. Н. ЕРЕМИН**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ВЛИЯНИЕ РАССЕИВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ДУГОГАСЯЩЕГО РЕАКТОРА

Целью данного научного исследования являются расчет и сравнение индуктивности экспериментального образца, управляемого дугогасительного реактора с учетом рассеивания и без. Сравнивается полученная индуктивность в результате эксперимента, моделирования в программе ELCUT и расчета на основе метода магнитных цепей. В ходе исследования установлено, что выбранная конструкция не обеспечивает необходимый диапазон регулирования. Доказано, что расчет по теории магнитных цепей неприемлем без учета рассеивания.

**Ключевые слова:** индуктивность, магнитные цепи, моделирование, ELCUT, компенсация емкостных токов.

В распределительных электрических сетях распространённой причиной снижения надёжности работы являются однофазные замыкания на землю, приводящие к перенапряжению. В последнее время для уменьшения последствий замыканий на землю, в сетях высокого и среднего напряжения самым лучшим образом зарекомендовали себя сети с компенсированной нейтралью (компенсация емкостных токов замыкания на землю) [1]. Данные сети предполагают заземление нейтрали через высокое реактивное сопротивление, через заземляющий дугогасящий реактор, настраиваемый в соответствии с ёмкостью сети относительно земли. Диапазон регулирования индуктивности и тока зависит от длины линии и типа сети (с воздушными лини-

ями, с кабельными линиями или смешанная сеть). В соответствии с РД 34.20179 «Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электросетях 6–35 кВ» Министерства энергетики [2]. Применение плавного регулируемых заземляющих дугогасящих реакторов (ДГР) позволяет существенно компенсировать ток замыкания на землю и таким образом оптимально использовать преимущества системы компенсации сети.

Распределительная электрическая сеть подвержена постоянным изменениям, поэтому существует необходимость регулировать индуктивность заземляющего ДГР, используемого для заземления нейтрали. Регулировка индуктивности может происходить по двум основным принципам: