

УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДОВ ПОВЫШЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ.

Бигун А.Я., Гиршин С.С., Петрова Е.В., Горюнов В.Н.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, Омск, пр-т Мира, 11), e-mail:barsbigun@list.ru

В данной работе приведены результаты анализа экономической эффективности применения мероприятий по снижению потерь электрической энергии в электроэнергетической системе. Данный анализ проводился на примере компенсации реактивной мощности, которая является одним из методов повышения пропускной способности линий электропередач и снижения потерь в них. Оценка экономической эффективности осуществлялась на основе расчетов годовых приведенных затрат, при различных мощностях устройств компенсации реактивной мощности, с учетом и без учета температурной зависимости сопротивлений элементов электроэнергетической сети. Выбор устройств компенсации реактивной мощности осуществлялся по наименьшему значению годовых приведенных затрат, согласно общепринятым правилам. Были приведены исследования по определению срока окупаемости вводимого мероприятия по снижению потерь энергии в системе электроснабжения.

Ключевые слова: провод повышенной пропускной способности, мероприятия по снижению потерь энергии, температура, компенсация реактивной мощности.

ACCOUNTING CONDUCTOR TEMPERATURE INCREASED BANDWIDTH WHEN SELECTING MEASURES TO REDUCE ENERGY LOSS BY THE EXAMPLE OF REACTIVE POWER COMPENSATION

Bigun A.Y., Girshin S.S., Petrova E.V., Gorunov V.N.

Federal State Educational Government-financed Institution of Higher Professional Education «Omsk State Technical University», Omsk, Russian Federation (644050, Omsk, pr-tMira, 11), e-mail:barsbigun@list.ru

In the given work results of the analysis of economic efficiency of application of actions for decrease in losses of electric energy in an electropower system are resulted. The given analysis was spent on an example indemnification of jet capacity which is one of methods of increase of throughput of electric mains and decrease in losses in them. The economic efficiency estimation was carried out on the basis of calculations of the annual resulted expenses at various capacities of devices of indemnification of jet capacity with the account and without temperature dependence of resistance of elements of an electropower network. The choice of devices of indemnification of jet capacity was carried out on the least value of the annual resulted expenses, according to the standard rules. Researches by definition of a time of recovery of outlay of entered action for decrease in losses of energy in electrical supply system have been resulted.

Keywords: wire increased bandwidth, measures to reduce energy losses, temperature, reactive power compensation.

Важным направлением работ в электроэнергетике является повышение эффективности мероприятий, направленных на уменьшение потерь, а также улучшение качества электрической энергии [2, 3, 7, 9]. Целью данной статьи является обоснование необходимости увеличения точности определения потерь.

Одним из наиболее распространенных мероприятий по снижению потерь энергии в электрических сетях является компенсация реактивной мощности. Именно компенсация рассматривается в ряде работ в качестве экспертного мероприятия при обосновании эффективности повышения точности расчета потерь путем учета температурной зависимости

сопротивлений сети [8]. Аналогичная задача для сети с проводами повышенной пропускной способности [4] решается в данной работе. Выбор оптимальных параметров компенсирующих устройств и нахождение сроков окупаемости проводятся на примере неразветвленной сети (рис. 1) с устройством компенсации реактивной мощности (УКРМ) на номинальное напряжение 10,5 кВ [8]. Условия проведения исследований представлены в табл. 1 [6, 10, 5].

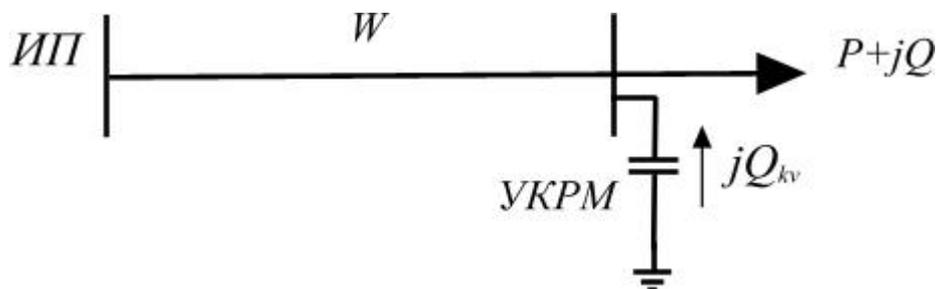


Рис. 1. Неразветвленная сеть: P , Q – активная и реактивная мощности нагрузки; Q_{kv} – реактивная мощность компенсирующего устройства, ИП – источник питания, W – линия

Таблица 1

Параметры проводов

Наименование и обозначение параметров	Численные значения (допущения)
Значение сопротивления проводов: без учета нагрева с учетом нагрева	сопротивление при 20 ⁰ С вычисляется по формуле $R=R_0(1+at_{np})$.
Погонное активное сопротивление провода АСПТ АТ1/20АС 50/8 при 20 °С, Ом/км	0,5723
Радиус жилы провода АСПТ АТ1/20АС 50/8, мм	4,8
Температурный коэффициент сопротивления α	0,00403 °С ⁻¹
Степень черноты поверхности провода ε	0,6
Температура воздуха t_g	1,7 °С
Атмосферное давление $P_{атм}$	100000 Па
Скорость ветра V	1 м/с
Средняя дневная сумма солнечной радиации, кВт·ч/м ² ·день E	5,5 кВт·ч/м ²
Интегрирующий множитель, переводящий потери	5000 ч (одинакова)

мощности в потери энергии, T	для потерь в линии и в УКРМ)
Стоимость электроэнергии $C_э$	2,098 руб/(кВт·ч)
Коэффициент приведения капиталовложений E_H	0,14 1/год
Норма ежегодных отчислений на ремонт, обслуживание и амортизацию электрооборудования a_p	0,059
Удельные потери активной мощности в УКРМ $\rho_{уд}$	0,002 кВт/квар
Напряжение в узле нагрузки	не меняется
Температура провода при отсутствии УКРМ	близка к максимально допустимой, но не превышает её
При напряжении 6-10 кВ коэффициент реактивной мощности $\text{tg}\varphi$	0,4

Решение задачи

На первом этапе решается задача оптимального выбора УКРМ в узле 10 кВ, исходя из минимума приведенных затрат. Выбор параметров только высоковольтных УКРМ объясняется стремлением максимально упростить поставленную задачу. Упрощенный подход, принятый в работе [8], объясняется тем, что задачи оптимального выбора высоковольтной и низковольтной УКРМ условно независимы, так как при оптимальном выборе УКРМ (10 кВ) оптимальная мощность УКРМ (0,4 кВ) не зависит от параметров линии 10 кВ, а только является функцией параметров трансформатора 10/0,4 кВ, а также соответствующих удельных стоимостей и собственных потерь УКРМ обоих классов напряжений.

Поставленная задача оптимизации можно решать на базе приближенного выражения для годовых приведенных затрат [8].

$$\begin{aligned}
 Z &= E_H K + I = (E_H + a_p)K + C_э T (\Delta P_l + \Delta P_{кв}) = \\
 &= (E_H + a_p)K + C_э T \left(\frac{P^2 + (Q - Q_{кв})^2}{U^2} R + \rho_{уд} Q_{кв} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

где K – капиталовложения на установку УКРМ; E_H – коэффициент приведения капиталовложений; I – годовые эксплуатационные издержки; a_p – норма ежегодных отчислений на ремонт, обслуживание и амортизацию электрооборудования; $C_э$ – стоимость электроэнергии; ΔP_l и $\Delta P_{кв}$ – потери мощности соответственно в линии и в УКРМ; T – интегрирующий множитель, переводящий потери мощности в потери энергии и имеющий

размерность времени; U – напряжение сети; R – активное сопротивление линии; $\rho_{y\partial}$ – удельные потери активной мощности в УКРМ.

Соотношение для нахождения оптимальных значений реактивной мощности устройств компенсации реактивной мощности $Q_{ky,опт}$ без учета и в случае учета температурной зависимости сопротивлений соответственно имеют вид [8]:

$$\frac{\partial Z}{\partial Q_{ky}} = (E_H + a_p) \frac{\partial K}{\partial Q_{ky}} - 2C_3 T \frac{Q - Q_{ky}}{U^2} R + \rho_{y\partial} C_3 T = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial Q_{ky}} = (E_H + a_p) \frac{\partial K}{\partial Q_{ky}} - 2C_3 T \frac{Q - Q_{ky,опт}}{U^2} R + C_3 T \left(\frac{P^2 + (Q - Q_{ky})^2}{U^2} \frac{\partial R}{\partial Q_{ky}} + \rho_{y\partial} C_3 T \right) = 0 \quad (3)$$

Анализ соотношений показывает, что оптимальная мощность УКРМ, определенная по уравнению (3), должна быть больше соответствующей величины, определенной по уравнению (2). Данный вывод обусловлен отрицательным значением, входящей в уравнение (3) производной активного сопротивления по мощности dR/dQ_{ky} . Действительно при увеличении Q_{ky} величина тока в линии становится меньше, а, следовательно, температура и активное сопротивление проводов уменьшаются. Исключением является случай, когда одновременно имеет место низкая загрузка линии при низкой температуре окружающей среды. Но с точки зрения величины потерь этот случай не заслуживает детального рассмотрения.

Вычисление температуры производилось на основе следующей математической модели теплового режима неизолированного провода [1]:

$$\alpha_{k6} = 0.0749 \sqrt{\frac{P}{T_e}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta t}{d}}; \quad \alpha_{k7} = 0.044 \frac{k_v (Pv)^{0.6}}{(T_e d)^{0.4}},$$

$$t_{np2} = a_2 I^4 + b_2 I^2 + c_2 \quad (4)$$

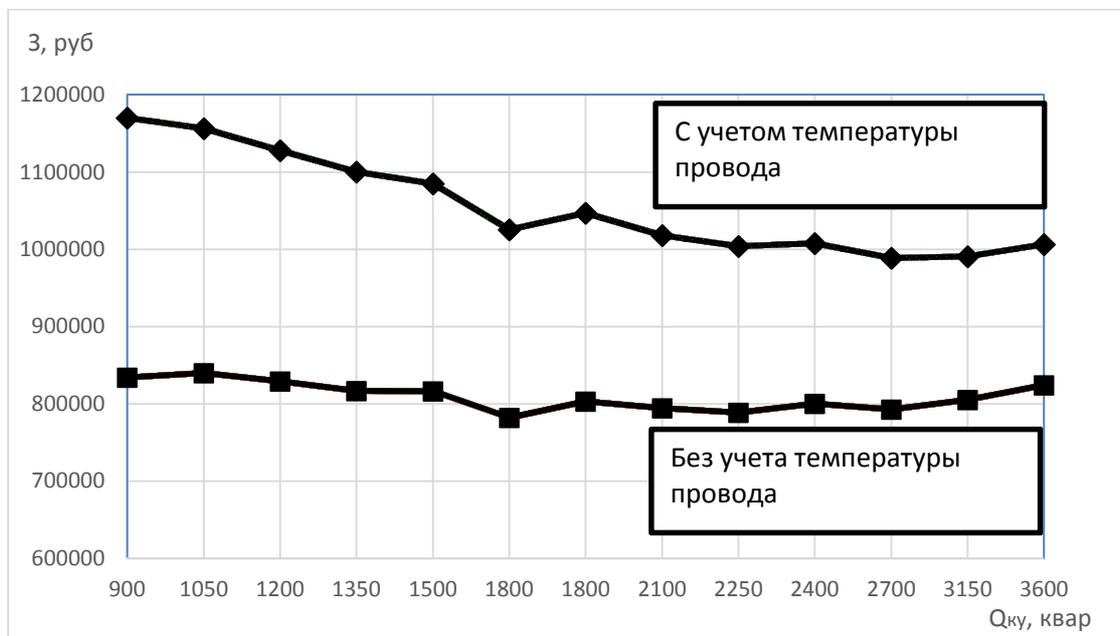
$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon C_0 \left[(273 - t_{np})^4 - (273 - t_e)^4 \right] \pi d + \alpha_k [t_{np} - t_e] \pi d - d S_s \varepsilon}{0.95 R_{20} (1 + 0.004 (t_{np} - 20))}}$$

где P – атмосферное давление, Па; d – диаметр провода, м²; k_v – коэффициент учитывающий влияние угла направления ветра к оси провода; v – скорость ветра, м/с; a_2 , b_2 , c_2 – коэффициенты аппроксимации; t_{np} – температура провода, °С; t_e – температура воздуха, °С; R_{20} – удельное активное сопротивление постоянному току при 20°С, Ом/м; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²°С; ε – степень черноты поверхности провода; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м; I – рабочий ток; S_s – интенсивность солнечной радиации, Вт/м².

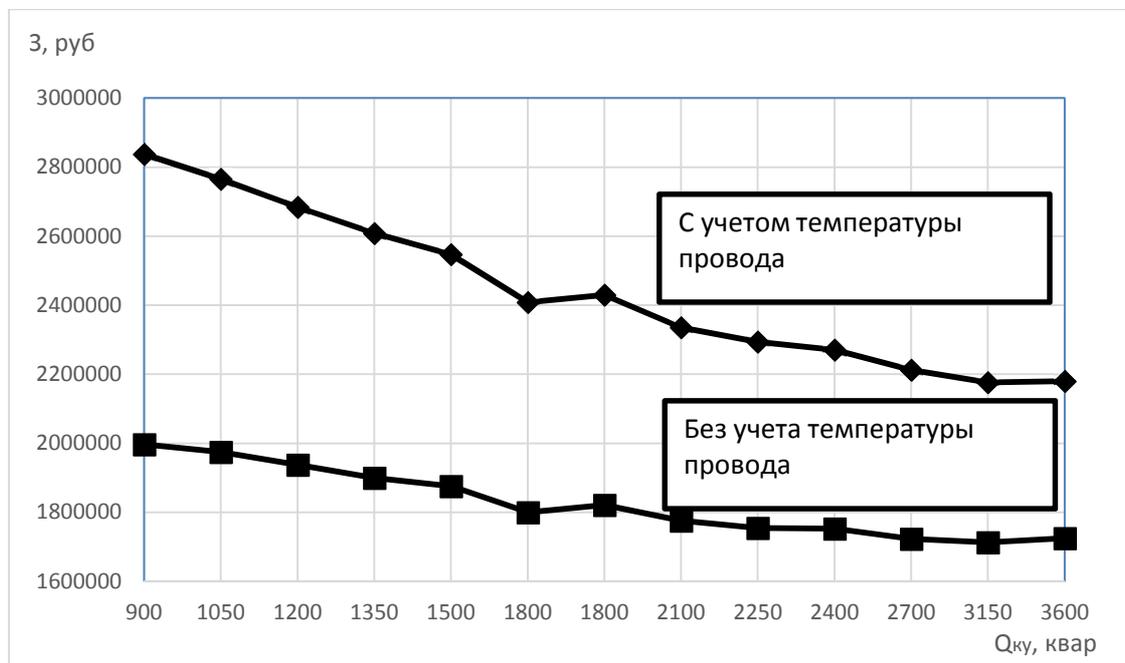
Анализ результатов

Результаты исследований представлены в табл. 2 и рис. 2. Нахождение степени увеличения оптимальной мощности с учетом нагрева $Q_{ку,онм.т}$ по отношению к оптимальной мощности без учета нагрева $Q_{ку,онм.}$ выполняется по формуле:

$$\varepsilon I = ((Q_{ку,онм.т} - Q_{ку,онм.}) / Q_{ку,онм.т}) 100\% \quad (5)$$



а)



б)

Рис. 2. Зависимость годовых приведенных затрат от мощности УКРМ для провода АСПТ АТ1/20АС 50/8 при мощности $P=5000$ кВт, $Q=3600$ квар а) при длине линии 0,4 км. б) при длине линии 1 км

Особенностями расчета приведенных затрат (рис. 2 и табл. 2) является то, что при нахождении затрат с учетом температуры и без учета температуры учитывалась стоимость потерь энергии, обусловленная передачей активной мощности. Так как значение активной мощности меняется при изменении сопротивления и температуры то и в первом и во втором случае она рассматривалась как переменная величина.

Таблица 2

Оптимальные мощности УКРМ для провода АСПТ АТ1/20АС 50/8 при мощностях нагрузки
 $P=5000$ кВт, $Q=3600$ квар

Длина линии, км	$Q_{ку}$, квар	Стоимость УКРМ, тыс. руб	З, тыс. руб		$Q_{ку,опт}$, квар		ε_1 , %	tgφ	t_{np} °С
			без учета t_{np}	с учетом t_{np}	без учета t_{np}	с учетом t_{np}			
0,3	2250	488,8	627,556	789,182	2250	2700	17	0,3	103
	2700	585,9	638,085	784,99				0,18	98,4
0,4	2250	488,8	788,583	1004,084	2250	2700	17	0,27	103
	2700	585,9	793,033	988,907				0,18	98,4
0,6	2700	585,9	1102,93	1396,741	2700	3150	14	0,18	98,4
	3150	673,1	1107,842	1385,954				0,09	96
0,8	2700	585,9	1412,827	1804,575	3150	3150	0	0,18	96
	3150	673,1	1410,444	1781,261				0,09	96
	3600	746,8	1424,826	1788,791				0	95,2
1	2700	585,9	1412,827	1804,575	3150	3150	0	0,18	98,5
	3150	673,1	1410,444	1781,261				0,09	96
	3600	746,8	1424,826	1788,791				0	95,2

Проведенные следования определяют следующие выводы:

1. Оптимальная мощность с учетом нагрева либо равна оптимальной мощности УКРМ без учета нагрева, либо превышает её. Среднее значение превышения ε_1 , найденные по формуле (5), по данным табл. 2, составляет 10 %.
2. Благодаря тому, что целевая функция в области оптимальных значений имеет пологий характер, увеличение оптимальных мощностей не приводит к аналогичному значительному экономическому эффекту.
3. Представленные выше значения экономической эффективности обусловлены только учетом нагрева. В целом экономический эффект от внедрения рассмотренного мероприятия может быть значительно больше за счет анализа всей сети (значения в таблице относятся к отдельным линиям) и улучшения температурного режима сети из-за уменьшения нагрузки.

Результаты исследования по определению срока окупаемости вводимого мероприятия по снижению потерь энергии можно оценить по формуле:

$$T_{ок} = \frac{K}{I_{исх} - I_{ПМ}} = \frac{K}{I_{a,исх} - I_{a,ПМ} + C_{э}(\Delta W_{исх} - \Delta W_{ПМ})}, \quad (6)$$

где $I_{ПМ}$ и $I_{исх}$ – годовые эксплуатационные издержки соответственно после ввода мероприятия и в исходном состоянии; $I_{a,ПМ}$ и $I_{a,исх}$ – составляющие издержек на амортизацию, обслуживание ремонт оборудования соответственно после ввода мероприятия и в исходном состоянии; $W_{ПМ}$ и $W_{исх}$ – потери электрической энергии после ввода мероприятия и в исходном режиме.

Проанализировав уравнение (6), можно сделать следующие выводы:

1. Если погрешности расчета $\delta(W_{ПМ})$ и $\delta(W_{исх})$ не одинаковы, то должны выполняться неравенства:

$$\delta(\Delta W_{исх} - \Delta W_{ПМ}) \gg \delta \Delta W_{исх}; \quad (7)$$

$$\delta(\Delta W_{исх} - \Delta W_{ПМ}) \gg \delta \Delta W_{ПМ}. \quad (8)$$

2. Погрешность нахождения $T_{ок}$ для большинства случаев будет еще значительнее, так как разность $(I_{a,исх} - I_{a,ПМ})$ имеет, как правило, отрицательные значения.
3. Первые два вывода проявляются при неучете температуры элементов сети, которая сама меняется в результате ввода мероприятия

Уменьшение потерь электрической энергии $\Delta W = (\Delta W_{исх} - \Delta W_{ПМ})$ без учета и с учетом нагрева определяется соответственно уравнениями:

$$\Delta W = T \left[\frac{P^2 + Q^2}{U^2} R - \frac{P^2 + (Q - Q_{кв})^2}{U^2} R - \rho_{уд} Q_{кв} \right] = T \left[\frac{2Q Q_{кв} - Q_{кв}^2}{U^2} R - \rho_{уд} Q_{кв} \right] \quad (9)$$

$$\Delta W = T \left[\frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_{исх} - \frac{P^2 + (Q - Q_{кв})^2}{U^2} R_{ПМ} - \rho_{уд} Q_{кв} \right] \quad (10)$$

где $R_{исх}$ и $R_{ПМ} > R_{исх}$ – активные сопротивления линии после и до ввода УКРМ, которые имеют разные значения из-за учета температурной зависимости.

Из соотношения (10) следует, что при учете температуры провода потери электрической энергии уменьшаются по следующим причинам:

1. За счет уменьшения передаваемой реактивной мощности.
2. В результате уменьшения активного сопротивления.
3. Благодаря сокращению потерь на передачу активной мощности.

В этом плане уравнение (9), записанное при допущении независимости сопротивления от температуры, является ограниченным, так как не позволяет учесть указанные факторы.

Отдавая должное позитивности применения УКРМ с точки зрения уменьшения потерь, полезно оценить сроки окупаемости приведенных в табл. 2 УКРМ.

Результаты таких исследований с учетом и без учета нагрева представлены в табл. 3.

Погрешность определения сроков окупаемости, обусловленная неучетом нагрева ε_2 , вычисляется по уравнению:

$$\varepsilon_2 = ((T_{окт} - T_{ок}) / T_{окт}) 100\% \quad (11)$$

где $T_{окт}$ и $T_{ок}$ – сроки окупаемости УКРМ с учетом и без учета температуры.

Таблица 3

Стоимости и сроки окупаемости установки УКРМ для провода
АСПТ АТ1/20АС 50/8 при мощностях нагрузки Р=5000 кВт, Q=3600квар

Длина линии, км	Расчет без учета t_{np}			Расчет с учетом t_{np}			ε_2 , %
	Q _{ку,опт} , квар	Стоимость УКРМ, тыс. руб	T _{ок} , лет	Q _{ку,опт} , квар	Стоимость УКРМ, тыс. руб	T _{ок} , лет	
0,3	2250	488,8	3,92	2700	585,9	1,66	136,1
0,4	2250	488,8	2,55	2700	585,9	1,17	117,9
0,6	2700	585,9	1,69	3150	673,1	0,82	106,1
0,8	3150	673,1	1,33	3150	673,1	0,6	121,7
1	3150	673,1	1,02	3150	673,1	0,5	104

Представленные в табл. 3 результаты вычислений по формуле (11) показывают, что минимальная погрешность срока окупаемости равна 104 %, максимальная – 136 %, средняя – 117 %. Факт соизмеримости средней погрешности с определяемой величиной свидетельствует о необходимости учета фактора нагрева при расчете сроков окупаемости установки УКРМ. Особую значимость приобретает учет нагрева при больших нагрузках элементов сети. Определение тенденций изменения погрешностей от типа провода и длины линии требует проведения дополнительных исследований.

Список литературы

1. Исследование достоверности расчетов температуры проводников воздушных линий электропередачи комплексом программ Ом1 / Е.В. Петрова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 291–296.
2. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры / С. С. Гиршин [и др.] // Омский научный вестник. – 2009. – № 3. – С. 176–179.

3. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах систем электроснабжения / С. Ю. Долингер [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 2. – С. 178–183.
4. Расчет погрешностей определения потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за неучета атмосферных и режимных факторов / Е. В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 2. – С. 191–197.
5. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – М.: ЭНАС, 2009. – 392 с.
6. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ. В 5 т. Т. 2 / Е. Ф. Макаров. – М.: Папирус Про, 2003. – 640 с.
7. Схематические решения активной фильтрации кривой тока в четырехпроводной трехфазной сети для обеспечения качества электрической энергии / В. Н. Горюнов [и др.] // Омский научный вестник. – 2011. – № 3. – С. 214–217.
8. Учет температурной зависимости сопротивления неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / Е. В. Петрова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 284–291.
9. Уточнение метода расчета температуры провода при постоянной нагрузке с учетом климатических факторов / С. С. Гиршин [и др.]; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2010. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ 08.04.2010, N198-B2010.
10. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 1 / под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. – М.: Изд-во МЭИ, 1995. – 440 с.

Рецензенты:

Черемисин В.Т., д.т.н., профессор, директор Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог» ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск;

Кузнецов А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск.