

УДК 621.311.1.016.25

Оценка степени снижения потерь активной мощности в линиях электропередачи при компенсации реактивной мощности

В. Н. Радкевич¹⁾, М. Н. Тарасова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассматривается метод оценки степени снижения потерь активной мощности в линиях электропередачи напряжением до 1 и 6–10 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий при установке у потребителя устройств компенсации реактивной мощности в зависимости от уровня напряжения, подведенного к конденсаторным установкам, с учетом диэлектрических потерь в конденсаторах. Напряжение в точке подключения компенсирующего устройства изменяется в диапазоне от 0,95 до 1,05 номинального напряжения конденсаторов. При исследовании не учитывались потери реактивной мощности в линии и ее зарядная мощность. Это обусловлено тем, что в электрических сетях промышленных предприятий в основном применяются кабельные линии относительно небольшой длины. Поэтому величины потребления и генерирования реактивной мощности линией электропередачи незначительны и не оказывают существенного влияния на поток реактивной мощности. Получены функциональные зависимости, позволяющие производить оценку степени снижения потерь активной мощности в линии электропередачи с учетом ее конкретных исходных данных. Произведен математический анализ полученных функциональных зависимостей. Выполнено исследование функции с помощью производных. Найдены точки экстремума функции, а также ее интервалы возрастания и убывания. Произведено графическое исследование полученной функциональной зависимости. Выяснено, что снижение потерь активной мощности зависит от технических параметров линии и конденсаторной установки, величины реактивной нагрузки потребителя электроэнергии, а также напряжения, подведенного к конденсаторной установке. Представленные в статье функциональные зависимости могут использоваться при проведении предварительных расчетов, необходимых для принятия решения по компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения производственных объектов. Их учет позволит более точно оценивать технико-экономический эффект от установки батарей конденсаторов в электрических сетях напряжением до 1 и 6–10 кВ.

Ключевые слова: линия электропередачи, реактивная мощность, компенсация, конденсаторная установка, потери мощности

Для цитирования: Радкевич, В. Н. Оценка степени снижения потерь активной мощности в линиях электропередачи при компенсации реактивной мощности / В. Н. Радкевич, М. Н. Тарасова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 1. С. 5–13

Адрес для переписки

Радкевич Владимир Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Address for correspondence

Radkevich Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Evaluating Degree of Active Power Losses Reduction in the Electric Power Lines with Reactive Power Compensation

V. N. Radkevich¹⁾, M. N. Tarasova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper considers evaluation procedure for the degree of active power losses reduction in the power transmission lines under 1 kV and 6–10 kV of the systems of electric power supply of industrial enterprises with compensating installations mounted at the side of the customer. The capacitor installations conform to the applied voltage level and factor in dielectric losses in the capacitors. The voltage at the compensating device terminal changes from 0.95 to 1.05 of the capacitors nominal voltage. The study did not account for reactive power losses in the line, nor did it for its charge capacity, conditioned by relative shortness of the cable lines generally operating in the mains of industrial enterprises. For this reason, the quantities of reactive power being consumed and generated by the transmission line are negligible and do not significantly affect the reactive power flux. The researchers obtain functional relations that allow estimating the degree of power loss reduction in the transmission line factoring in its explicit initial data. They perform mathematical analysis of the obtained functional relations and study the function by means of derivatives. The function extremum points are found as well as the intervals of its increment and decrement. A graphical research of the obtained functional relation is performed. It is ascertained that reduction of the active power losses is contingent on the line and the capacitor-installation engineering factors, the electrical energy consumer reactive load value as well as the voltage applied to the capacitor installation. The functional relations presented in the article can be employed in scoping calculation necessary for decision making on the reactive power compensation in systems of the industrial facilities electric power supply. Their account will allow a more accurate estimate of technical and economic effect of the capacitor bank installation in the electrical mains under 1 kV and 6–10 kV.

Keywords: electric power line, reactive power, compensation, capacitor installation, power loss

For citation: Radkevich V. N., Tarasova M. N. (2016) Evaluating Degree of Active Power Losses Reduction in the Electric Power Lines with Reactive Power Compensation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (1), 5–13 (in Russian)

Введение

Одним из основных вопросов, решаемых как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации систем электроснабжения (СЭС) промышленных объектов, является компенсация реактивной мощности (РМ) [1, 2]. В соответствии с действующими нормативными документами и руководящими техническими материалами в качестве основного средства компенсации РМ на промышленных предприятиях следует применять силовые конденсаторы [3, 4]. Для компенсации РМ в электрических сетях общего назначения, как правило, применяются комплектные конденсаторные установки (КУ), содержащие помимо конденсаторов различного вспомогательное электрооборудование: коммутационные и защитные аппараты, разрядные резисторы, устройства управления и т. п. [5]. На промышленных предприятиях в первую очередь следует использовать КУ напряжением до 1 кВ. Высоковольтные конденсаторные батареи, которые выпускаются заводами-производителями на номинальное напряжение 6,3 и 10,5 кВ, могут применяться лишь на промышленных предприятиях с непрерывным режимом работы при технико-экономическом обосновании [4].

Конденсаторы обеспечивают разгрузку от реактивных токов всех элементов СЭС от места установки КУ до источника питания в энергосистеме. При этом снижаются потери активной мощности и электроэнергии в линиях электропередачи, а также в силовых трансформаторах, к которым они подключены.

Основная часть

В статье исследовано, как влияет компенсация РМ в сети промышленного предприятия на общие потери активной мощности в линии электропередачи с учетом диэлектрических потерь в конденсаторах. Для этого рассмотрена схема электрической сети, приведенная на рис. 1.

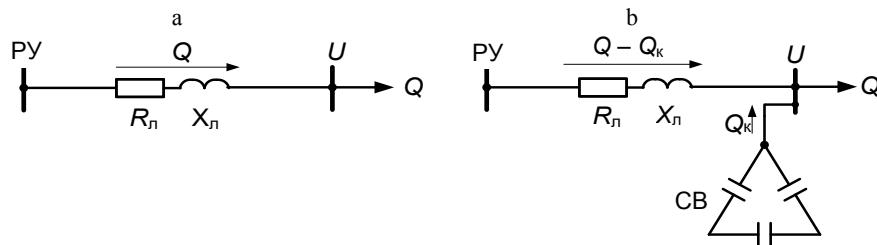


Рис. 1. Схема электрической сети: а – без компенсирующего устройства; б – с конденсаторной установкой

Fig. 1. Power system diagram: а – without a compensating device; б – with the capacitor installation

Линия электропередачи, имеющая активное ($R_{\text{л}}$) и индуктивное ($X_{\text{л}}$) сопротивление, присоединена к шинам распределительного устройства (РУ) трансформаторной подстанции (или распределительного пункта). Линия питает потребителя электроэнергии с реактивной нагрузкой Q . При отсутствии КУ из питающей сети (напряжением до 1 кВ или 10 (6) кВ) по линии передается реактивная мощность Q (рис. 1а). Отметим, что здесь не учтены потери реактивной мощности в линии и ее зарядная мощность, так как они незначительны в связи с тем, что в СЭС промышленных предприятий, как правило, применяются кабельные линии относительно небольшой длины.

Если к шинам потребителя электроэнергии подключить конденсаторную установку СВ, генерирующую реактивную мощность $Q_{\text{к}}$ (рис. 1б), то потребляемая из сети 10 (6) кВ РМ уменьшится и составит величину $(Q - Q_{\text{к}})$. При этом снизится реактивная нагрузка линии электропередачи и, следовательно, потери активной мощности, вызванные прохождением по линии реактивного тока.

Величина, на которую снижаются потери активной мощности в активном сопротивлении линии электропередачи за счет применения КУ, определяется по формуле

$$\delta P_{\text{л}} = \Delta P_1 - \Delta P_2, \quad (1)$$

где ΔP_1 , ΔP_2 – потери активной мощности в линии, обусловленные реактивной нагрузкой до и после включения компенсирующего устройства соответственно, кВт.

Формула (1) может быть представлена в следующем виде:

$$\delta P_{\text{л}} = \frac{Q^2}{U^2} R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} - \frac{(Q - Q_{\text{к}})^2}{U^2} R_{\text{л}} \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где $R_{\text{л}}$ – активное сопротивление одной фазы линии, Ом; Q – реактивная нагрузка потребителя, питающегося по линии, квар; $Q_{\text{к}}$ – мощность КУ в конце линии, квар; U – действительное напряжение линии электропередачи, кВ.

После преобразования (2) получим

$$\delta P_{\text{л}} = (2QQ_{\text{к}} - Q_{\text{к}}^2) \frac{R_{\text{л}}}{U^2} \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Как видно из выражения (3), $\delta P_{\text{л}}$ имеет положительное значение (т. е. потери мощности снижаются) только при условии $2QQ_{\text{к}} > Q_{\text{к}}^2$. В остальных случаях $\delta P_{\text{л}} \leq 0$.

В расчетах следует учитывать, что в самих КУ также имеют место потери активной мощности. В этом случае величина, на которую снижаются потери активной мощности в линии электропередачи при компенсации реактивной мощности, определяется по выражению [6]

$$\delta P_{\text{л}} = (2QQ_{\text{к}} - Q_{\text{к}}^2) \frac{R_{\text{л}}}{U_{\text{ном}}^2} \cdot 10^{-3} - k_{\text{ку}} Q_{\text{к}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{ку}}$ – удельные потери активной мощности в компенсирующих устройствах, кВт/квар.

Реактивную мощность потребителя электроэнергии, передаваемую по линии до включения КУ, представим как

$$Q = \frac{U^2}{X_{\text{н}}}, \quad (5)$$

где $X_{\text{н}}$ – реактивное сопротивление нагрузки, кОм.

Мощность, генерируемая КУ, зависит от величины подведенного напряжения. Номинальная мощность КУ $Q_{\text{кн}}$ генерируется только при условии, что в точке ее подключения напряжение электрической сети U равно номинальному напряжению КУ $U_{\text{ном}}$. При фактических значениях напряжения U , отличающихся от $U_{\text{ном}}$, мощность КУ составит [7]

$$Q_{\text{к}} = Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2}. \quad (6)$$

Запишем (4) с учетом формул (5) и (6)

$$\delta P_{\text{л}} = \left(2 \frac{U^2}{X_{\text{н}}} Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2} - \left(Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2} \right)^2 \right) \frac{R_{\text{л}}}{U^2} \cdot 10^{-3} - k_{\text{ку}} Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2}. \quad (7)$$

Выражение (7) представим в виде

$$\delta P_{\text{л}} = \left(2 \frac{U^4}{X_{\text{н}} U_{\text{ном}}^2} - Q_{\text{кн}}^2 \frac{U^4}{U_{\text{ном}}^4} \right) \frac{R_{\text{л}}}{U^2} \cdot 10^{-3} - k_{\text{кв}} Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2}. \quad (8)$$

Выполним дальнейшие преобразования рассматриваемой зависимости:

$$\delta P_{\text{л}} = \left(2 \frac{U^2}{X_{\text{н}} U_{\text{ном}}^2} - Q_{\text{кн}}^2 \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^4} \right) R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} - k_{\text{кв}} Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2}; \quad (9)$$

$$\delta P_{\text{л}} = \left(2 Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2 X_{\text{н}}} - Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2} \frac{Q_{\text{кн}}}{U_{\text{ном}}^2} \right) R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} - k_{\text{кв}} Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2}. \quad (10)$$

В результате получим следующую формулу для расчета степени снижения потерь активной мощности в линии электропередачи при установке у потребителя компенсирующего устройства:

$$\delta P_{\text{л}} = Q_{\text{кн}} \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2} \left(\left(\frac{2}{X_{\text{н}}} - \frac{Q_{\text{кн}}}{U_{\text{ном}}^2} \right) R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} - k_{\text{кв}} \right). \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет исследовать зависимость величины $\delta P_{\text{л}}$ от входящих в нее переменных. В статье рассматривается влияние величины напряжения электрической сети на снижение потерь мощности в линии электропередачи с учетом диэлектрических потерь в конденсаторах. При этом предполагается, что значение напряжения задается питающим силовым трансформатором и незначительно изменяется по длине линии.

Действительное напряжение, подведенное к зажимам КУ, можно представить как

$$U = \alpha U_{\text{ном}}, \quad (12)$$

где α – коэффициент, показывающий, во сколько раз фактическое значение напряжения отличается от $U_{\text{ном}}$.

Предприятиями электротехнической промышленности конденсаторы на напряжении до 1 кВ выпускаются с разными значениями $U_{\text{ном}}$ (220, 230, 380, 400, 415 В и т. д.). При проектировании, как правило, выбираются комплектные КУ, у которых $U_{\text{ном}}$ равно номинальному напряжению сети. В то же время КУ включаются в разных точках сети, в которых фактическое напряжение U может отличаться от номинального значения из-за изменения потерь напряжения в элементах системы электроснабжения при неровном графике электрической нагрузки.

К сети напряжением до 1 кВ подключаются осветительные и силовые электроприемники, для которых нормируется установившееся отклонение напряжения $\delta U_{\text{у}}$ от номинального значения. Нормально допустимые значения $\delta U_{\text{у}}$ на выводах приемников электрической энергии равны $\pm 5\%$ [8]. Таким образом, при одинаковых номинальных напряже-

ниях КУ и электрической сети коэффициент α можно рассматривать как вспомогательный параметр качества электроэнергии, который в нормальном режиме имеет значения от 0,95 до 1,05.

В сетях 6–10 кВ промышленных предприятий в нормальных условиях эксплуатации напряжение может изменяться в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения. В то же время в них применяются КУ с конденсаторами, имеющими номинальные напряжения 6,3 и 10,5 кВ. Следовательно, в высоковольтных электроустановках коэффициент $\alpha = 0,95\text{--}1,00$.

Запишем выражение (11) с учетом (12):

$$\delta P_{\text{л}} = Q_{\text{кн}} \alpha^2 \left(\left(\frac{2}{X_{\text{н}}} - \frac{Q_{\text{кн}}}{U_{\text{ном}}^2} \right) R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} - k_{\text{ку}} \right). \quad (13)$$

Исследуем функцию (13) с помощью производных [9]. Найдем ее точки экстремума, а также интервалы возрастания и убывания, продифференцировав $\delta P_{\text{л}}$ по основанию α :

$$\delta P'_{\text{л}} = 2Q_{\text{кн}} \alpha \left(\left(\frac{2}{X_{\text{н}}} - \frac{Q_{\text{кн}}}{U_{\text{ном}}^2} \right) R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} - k_{\text{ку}} \right). \quad (14)$$

Производная представляет собой линейную функцию, равную нулю при $\alpha = 0$. Эта точка разбивает всю область определения данной функции на два интервала: $(-\infty, 0)$ и $(0, \infty)$. Знаки производной слева и справа от критической точки $\alpha = 0$ отмечены на рис. 2.

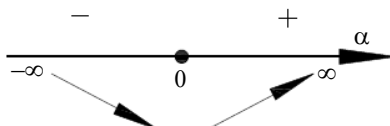


Рис. 2. К исследованию знака производной

Fig. 2. To examination of the derivative sign

Очевидно, что точка $\alpha = 0$ является точкой минимума функции, которая убывает на интервале $(-\infty \dots, 0)$ и возрастает на интервале $(0, \dots \infty)$.

Выполним графическое исследование полученной зависимости (13). Функция представляет собой параболу, ветви которой направлены вверх, а вершина находится в точке минимума функции $(0, 0)$. Вместе с тем при анализе графического изображения функции (13) следует учитывать два фактора, ограничивающих область значений аргумента функции α [10]:

- в соответствии с физическим смыслом параметра α область его определения включает в себя лишь неотрицательные числа ($\alpha \geq 0$);
- согласно требованиям, предъявляемым к параметрам качества электрической энергии, в частности в отношении предельно допустимых отклонений напряжения от номинального значения, коэффициент α должен принадлежать промежутку $[0,95; 1,05]$.

Построение графика функции (13) с учетом всех налагаемых на аргумент функции ограничений позволяет наглядно проиллюстрировать ответ на вопрос, возрастает или убывает величина снижения потерь активной мощности в линии электропередачи при компенсации реактивной мощности с учетом потерь в КУ при изменении напряжения сети в нормируемых границах: $\pm 5\%$ от величины $U_{\text{ном}}$.

При $\alpha = 1$, т. е. при подведенном к КУ напряжении, равном номинальному, формула для расчета величины снижения потерь мощности $P_{\text{лн}}$ в линии при установке КУ имеет вид

$$\delta P_{\text{лн}} = Q_{\text{кн}} \left(\left(\frac{2}{X_{\text{н}}} - \frac{Q_{\text{кн}}}{U_{\text{ном}}^2} \right) R_{\text{л}} 10^{-3} - k_{\text{ку}} \right). \quad (15)$$

С учетом (15) формулу (13) представим как

$$\delta P_{\text{л}} = \alpha^2 \delta P_{\text{лн}}. \quad (16)$$

Очевидно, что при $\alpha = 1$ для КУ обеспечивается наиболее рациональный режим по напряжению. Поэтому будем рассматривать его в качестве базового при оценке степени изменения потерь мощности при установке в электрической сети промышленного предприятия КУ. Тогда относительное снижение потерь активной мощности в линии электропередачи при использовании КУ

$$\delta P_{\text{ло}}(\alpha) = \frac{\delta P_{\text{л}}}{\delta P_{\text{лн}}} = \alpha^2. \quad (17)$$

Построим график функции (17) и отобразим на нем границы допустимой области определения параметра α в соответствии с указанными выше ограничениями, накладываемыми на этот параметр (рис. 3).

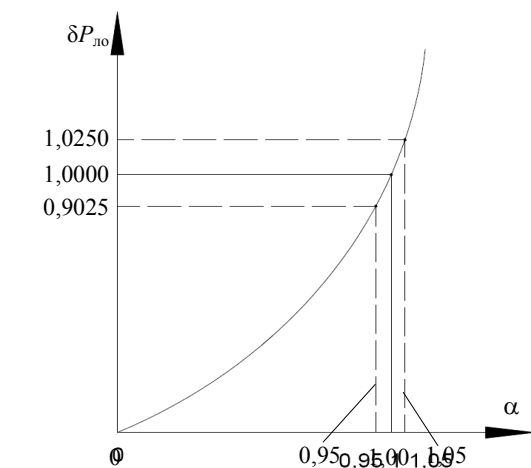


Рис. 3. График зависимости $\delta P_{\text{ло}}(\alpha) = \alpha^2$

Fig. 3. Dependence diagram $\delta P_{\text{ло}}(\alpha) = \alpha^2$

Из графика рис. 3 видно, что функциональная зависимость представляет собой часть правой ветви параболы, ограниченную асимптотами $\alpha = 0,95$ и $\alpha = 1,05$. Величина $\delta P_{\text{ло}}(\alpha)$ возрастает на нормируемом интервале значений α . Наибольшее возможное значение $\delta P_{\text{лmax}}$ функция принимает при $\alpha = 1,05$, а наименьшее $\delta P_{\text{лmin}}$ при $\alpha = 0,95$:

$$\delta P_{\text{лmax}} = 1,05^2 Q_{\text{кн}} \left(\left(\frac{2}{X_{\text{н}}} - \frac{Q_{\text{кн}}}{U_{\text{ном}}^2} \right) R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} - k_{\text{ку}} \right) = 1,025 \delta P_{\text{лн}}; \quad (18)$$

$$\delta P_{\text{лmin}} = 0,95^2 Q_{\text{кн}} \left(\left(\frac{2}{X_{\text{н}}} - \frac{Q_{\text{кн}}}{U_{\text{ном}}^2} \right) R_{\text{л}} \cdot 10^{-3} - k_{\text{ку}} \right) = 0,9025 \delta P_{\text{лн}}. \quad (19)$$

Относительные максимальное и минимальное значения величины снижения потерь мощности в линии электропередачи соответственно равны:

$$\delta P_{\text{ло}}(\alpha)_{\text{max}} = 1,025; \quad (20)$$

$$\delta P_{\text{ло}}(\alpha)_{\text{min}} = 0,9025. \quad (21)$$

Из формул (17), (20) и (21) следует, что при увеличении подведенного напряжения U на 5 % значение $\delta P_{\text{л}}$ по отношению к $\delta P_{\text{лн}}$ возрастает на 2,5 %, а при снижении U на 5 % уменьшается на 9,75 %. Предельно допустимое понижение напряжения приводит к существенному уменьшению $\delta P_{\text{ло}}(\alpha)$, в то время как повышение напряжения в допустимых пределах незначительно влияет на относительное снижение потерь активной мощности в линии электропередачи.

Полученные зависимости могут использоваться для оценки степени снижения потерь активной мощности при применении компенсирующих устройств в системах электроснабжения промышленных предприятий.

ВЫВОДЫ

1. Получены функциональные зависимости для оценки степени снижения потерь активной мощности в линиях электропередачи при компенсации реактивной мощности потребителя в зависимости от уровня напряжения, подведенного к конденсаторным установкам, с учетом диэлектрических потерь в конденсаторах.

2. Произведен математический анализ полученных функциональных зависимостей, которые могут использоваться при принятии решений по компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения производственных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. М.: Энергия, 1975. 752 с.
2. Железко, Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
3. Электроснабжение промышленных предприятий. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-297–2014 (02250). Минск: Мин-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2014. 29 с.
4. Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. М.: ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект». 1993. № 2. 80 с.
5. Правила устройства электроустановок. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 640 с.
6. Радкевич, В. Н. Электроснабжение промышленных предприятий / В. Н. Радкевич, В. Б. Козловская, И. В. Колосова. Минск: ИВЦ Минфина, 2015. 589 с.
7. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева. М.: Энергоатомиздат, 1984. 472 с.
8. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109–97. Взамен ГОСТ 13109–87; введ. 01.01.1999; РБ 01.08.1999. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. 31 с.
9. Гусак, А. А. Справочник по высшей математике / А. А. Гусак, Г. М. Гусак, Е. А. Бричикова. М.: Тетрасистем, 2006. 545 с.
10. Радкевич, В. Н. Оценка снижения потерь активной мощности в трансформаторах при установке батарей низковольтных конденсаторов / В. Н. Радкевич, М. Н. Тарасова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 5. С. 27–37.

Поступила 01.10.2015 Подписана в печать 11.11.2015 Опубликовано онлайн 29.01.2016

REFERENCES

1. Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strakhov S. V. (1975) *Electrical Circuit Analysis Principia*. Moscow, Energy. 752 p. (in Russian).
2. Zhelezko Yu. S. (1985) *Reactive Power Compensation and Electric Energy Quality Improvement*. Moscow, Energoatomizdat. 224 p. (in Russian).
3. ТКП 45-4.04-297–2014 (02250). *Electric Power Supply for the Industrial Enterprises. Engineering Standards*. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2014. 29 p. (in Russian).
4. *Instruction and Information Materials on Electrical Installations Design*. Moscow: VNIPI 'Tyazhpromelectroproject', 1993, (2). 80 p. (in Russian).
5. *Operational Code for Electrical Installations*. 6th ed., Revised and Expanded. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 640 p. (in Russian).
6. Radkevich V. N., Kozlovskaya V. B., Kolosova I. V. (2015) *Electric Power Supply for the Industrial Enterprises*. Minsk: the Ministry of Finance Data-Computing Center. 589 p. (in Russian).
7. Fedorov A. A., Kameneva V. V. (1984) *Framework of Electric Power Supply for the Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat. 472 p. (in Russian).
8. State Standards 13109–97. *Electric Energy. Compatibility of Technical Equipment. Quality Standard for the Electric Power in the Electricity Supply Systems of General Utility*. Minsk, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1999. 31 p. (in Russian).
9. Gusak A. A., Gusak G. M., Brichikova E. A. (2006) *Reference Book on Higher Mathematics*. Moscow, Tetrasytem. 545 p. (in Russian).
10. Radkevich V. N., Tarasova M. N. (2014) Evaluating Active Power Losses Reduction in the Transformers with Installation of the Low-Voltage Capacitor Batteries. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obiedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (5), 27–37 (in Russian).

Received: 1 October 2015 Accepted: 11 November 2015 Published online: 29 January 2016