

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249>

УДК 621.316

Взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий

В. П. Счастный¹⁾, А. И. Жуковский²⁾

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

²⁾ЧУП «КРМ Инжиниринг» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Экономичность системы электроснабжения предприятия зависит от качества электрической энергии и ее потерь в электрических сетях, в значительной степени определяемых режимами регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. Зачастую на практике задачи регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий, включающих электрические сети напряжением до 1 кВ, а также 6, 10 кВ и выше, решаются раздельно. Это ведет к нерациональному использованию имеющихся устройств регулирования напряжения, недоиспользованию установленной мощности компенсирующих устройств, оказывает влияние на регулирование напряжения в электрических сетях энергоснабжающей организации. Поскольку указанные режимы нераздельно связаны, правильно их определить можно лишь с использованием комплексного подхода, основанного на технико-экономических критериях и учитывающего технические требования и местные условия. В настоящей статье анализируется взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий с точки зрения обеспечения качества электроэнергии и минимизации нагрузочных потерь мощности. Представлены методики и результаты расчетов (на примере конкретного промышленного объекта) по определению отклонений и потерь напряжения в электрической сети и выбору параметров регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. Вследствие тесной взаимосвязи указанных режимов, затрагивающей все уровни напряжения, эффективность мероприятий невозможно обеспечить без использования многофункциональных устройств управления оборудованием трансформаторных подстанций.

Ключевые слова: электрическая сеть, трансформаторная подстанция, регулирование напряжения, компенсация реактивной мощности

Для цитирования: Счастный, В. П. Взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / В. П. Счастный, А. И. Жуковский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 239–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249>

Адрес для переписки

Счастный Валерий Петрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
val.sc@mail.ru

Address for correspondence

Schasny Valery P.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
val.sc@mail.ru

On the Mutual Influence of Voltage Control Modes and the Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises

V. P. Schasny¹⁾, A. I. Zhukouski²⁾

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

²⁾PUE "KRM Engineering" (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The efficiency of an enterprise's power supply system depends on the quality of electricity and the losses of the latter in electrical networks; both being largely determined by the modes of voltage control and reactive power compensation. In practice, the problems of voltage control and reactive power compensation in power supply systems of industrial enterprises, including electric networks with a voltage of up to 1 kV, as well as 6, 10 kV and higher, are often solved separately. It triggers an irrational use of existing voltage control devices, underutilization of the installed capacity of compensating devices, and affects the voltage control in the electrical networks of the power supply organization. Since voltage management and compensation modes of reactive power are inseparable, they can be correctly determined only with the use of an integrated approach based on technical and economic criteria and taking into account technical requirements and local conditions. This article analyzes the mutual influence of voltage control and reactive power compensation modes in the electrical networks of industrial enterprises from the point of view of ensuring the quality of electricity and minimizing load power losses. The method and results of calculations (on the example of a specific industrial facility) for determining voltage deviations and losses in the electrical network as well as for selecting parameters for voltage control and reactive power compensation are presented. Due to the close relationship of these modes that affect all voltage levels, the effectiveness of measures cannot be ensured without the use of multifunctional devices for controlling the equipment of transformer substations.

Keywords: electric network, transformer substation, voltage control, reactive power compensation

For citation: Schasny V. P., Zhukouski A. I. (2021) On the Mutual Influence of Voltage Control Modes and the Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 239–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249> (in Russian)

Введение

С введением в эксплуатацию генерирующих мощностей Белорусской АЭС и ее интеграцией в баланс энергосистемы ожидаются изменения в структуре электропотребления, обусловленные увеличением объемов потребления электроэнергии промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, электрифицированным железнодорожным и городским транспортом. Рост электропотребления, в свою очередь, требует повышения пропускной способности электрических сетей, т. е. увеличения максимально допустимых величин мощности, которые могут быть переданы потребителям с учетом условий эксплуатации, норм качества электрической энергии и параметров надежности функционирования энергосистемы.

В рамках Отраслевой программы развития электроэнергетики на 2016–2020 гг. реализованы масштабные проекты строительства и реконструкции электрических сетей и подстанций энергосистемы. При этом рост электропотребления промышленных предприятий требует увеличения про-

пускной способности их собственных сетей за счет модернизации систем электроснабжения [1–2].

Подходы к решению проблемы

Принимая решения по модернизации систем электроснабжения промышленных предприятий, в первую очередь нужно рассматривать возможности повышения пропускной способности электрических сетей и регулирования напряжения, предоставляемые компенсацией реактивной мощности (КРМ) при использовании компенсирующих устройств различных типов. Следует заметить, что вследствие многолетнего отсутствия в Беларуси платы за реактивную энергию (главный экономический рычаг стимулирования КРМ) эффективность ее компенсации на большинстве промышленных предприятий крайне низкая.

Для нормальной работы электроприемников в различных режимах нагрузки на их выводах должны поддерживаться нормированные уровни напряжения путем встречного регулирования напряжения в центрах питания. В настоящее время это обеспечивается лишь на шинах 6, 10 кВ подстанций 110/35/10(6) кВ, оборудованных трансформаторами с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), при условии, что последние работают нормально. Технических средств для встречного регулирования напряжения на шинах 0,4 кВ потребительских подстанций нет, поэтому при максимальной нагрузке отклонения напряжения обычно отрицательные, а при минимальной – положительные, т. е. принцип встречного регулирования напряжения действует наоборот. Положение усугубляется также бесконтрольным потреблением и выдачей реактивной мощности потребителями.

Использование установок компенсации реактивной мощности (УКРМ) с подключением их к шинам низшего напряжения подстанций требует учета ограничений как при выборе параметров УКРМ, так и при определении режимов работы имеющихся устройств регулирования напряжения.

Потеря напряжения в сети с КРМ, принятая равной продольной составляющей падения напряжения, при пренебрежении поперечной составляющей определяется выражением

$$\Delta U = \frac{PR + (Q - Q_k)X}{U}, \quad (1)$$

где P – поток активной мощности в сети, кВт; Q – то же реактивной мощности в сети, квар; R , X – активное и реактивное сопротивления сети, Ом; Q_k – мощность УКРМ, Ом; U – напряжение сети, кВ.

Влияние КРМ на величину потери напряжения в сети и отклонение напряжения у потребителя удобно рассматривать, оперируя показателем степени компенсации, определяемой соотношением $C = Q_k/Q$, о. е. Введя в выражение (1) степень компенсации, получим

$$\Delta U = \frac{PR + QX(1-C)}{U}. \quad (2)$$

С помощью выражения (2) можно определить фактическую потерю напряжения в любом элементе сети при любом значении степени компенсации реактивной мощности.

Действующий стандарт [3] устанавливает нормы качества электрической энергии в точках ее передачи пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения, т. е. на границах балансовой принадлежности электрических сетей. На промышленных предприятиях, имеющих на балансе подстанции глубокого ввода напряжением 110/10(6) кВ, 35/10(6) кВ, точки передачи электрической энергии, как правило, приняты на присоединениях питающих линий напряжением 110, 35 кВ. Величина согласованного напряжения и допустимые отклонения напряжения в указанных точках оговариваются в договоре электроснабжения, заключаемом между энергоснабжающей организацией и потребителем электрической энергии (абонентом). Таким образом, ответственность энергоснабжающей организации распространяется на электрическую сеть до точки передачи электрической энергии, далее – ответственность абонента.

Система электроснабжения крупного промышленного предприятия включает одну либо несколько главных понизительных подстанций напряжением 110/10(6) кВ, 35/10(6) кВ, распределительные пункты, подстанции и линии электропередачи напряжением 10, 6 кВ, а также линии напряжением до 1 кВ. Отклонение напряжения на стороне низшего напряжения подстанции $\delta U_{\text{нн}}$ равно сумме отклонения напряжения на стороне высшего напряжения $\delta U_{\text{вн}}$ и надбавки трансформатора $\delta U_{\text{нб}}$ за вычетом потери напряжения в трансформаторе $\Delta U_{\text{т}}$. При подключении УКРМ к шинам низшего напряжения подстанции отклонение напряжения на стороне низшего напряжения составит

$$\delta U_{\text{нн}} = \delta U_{\text{вн}} + \delta U_{\text{нб}} - \Delta U_{\text{т}} = \delta U_{\text{вн}} + \delta U_{\text{нб}} - \frac{PR_{\text{т}} + QX_{\text{т}}(1-C)}{U}. \quad (3)$$

Значения отклонения напряжения на стороне низшего напряжения подстанции при изменении степени компенсации от 0 до 1 и различных надбавках трансформатора со ступенями РПН $\pm(9 \cdot 1,78) \%$ приведены в табл. 1. В качестве примера рассмотрен один из трансформаторов марки ТРДН 25000/110, установленный на ГПП 110/6 кВ «Гранитная» (РУПП «ГРАНИТ»). Расчетные параметры нагрузки в максимальном режиме: $P = 15,0$ МВт; $Q = 11,6$ Мвар. В расчете условно принято $\delta U_{\text{вн}} = +5 \%$ – const.

Допустим, что, согласно заданному режиму регулирования напряжения, на стороне низшего напряжения подстанции должно поддерживаться положительное отклонение напряжения в диапазоне 4–6 %. Как видно из данных табл. 1, требуемое отклонение напряжения можно обеспечить под-

бором надбавки трансформатора в диапазоне 0–5,34 % и обеспечением соответствующей степени компенсации в диапазоне 0–1. С точки зрения минимизации нагрузочных потерь мощности в сети предпочтительнее принимать степень компенсации равной или близкой к 1, а диапазон регулирования РПН определять исходя из принятой степени компенсации.

Таблица 1

Отклонение напряжения на стороне низшего напряжения подстанции при различных значениях степени компенсации и надбавки трансформатора с устройством регулирования напряжения под нагрузкой

Voltage deviation on the low voltage side of the substation at different values of the degree of compensation and surcharge of the transformer with a load voltage control device

Надбавка трансформатора с устройством регулирования напряжения под нагрузкой, %	Отклонение напряжения на стороне низшего напряжения подстанции при различных значениях степени компенсации, %					
	C = 0	C = 0,2	C = 0,4	C = 0,6	C = 0,8	C = 1,0
-16,02	-16,2	-15,2	-14,2	-13,2	-12,3	-11,3
-14,24	-14,4	-13,4	-12,4	-11,5	-10,5	-9,5
-12,46	-12,6	-11,6	-10,7	-9,7	-8,7	-7,7
-10,68	-10,8	-9,9	-8,9	-7,9	-6,9	-5,9
-8,90	-9,1	-8,1	-7,1	-6,1	-5,1	-4,2
-7,12	-7,3	-6,3	-5,3	-4,3	-3,4	-2,4
-5,34	-5,5	-4,5	-3,5	-2,6	-1,6	-0,6
-3,56	-3,7	-2,7	-1,8	-0,8	0,2	1,2
-1,78	-1,9	-1,0	0,0	1,0	2,0	3,0
0	-0,2	0,8	1,8	2,8	3,8	4,7
1,78	1,6	2,6	3,6	4,6	5,5	6,5
3,56	3,4	4,4	5,4	6,3	7,3	8,3
5,34	5,2	6,2	7,1	8,1	9,1	10,1
7,12	7,0	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9
8,90	8,7	9,7	10,7	11,7	12,7	13,6
10,68	10,5	11,5	12,5	13,5	14,4	15,4
12,46	12,3	13,3	14,3	15,2	16,2	17,2
14,24	14,1	15,1	16,0	17,0	18,0	19,0
16,02	15,9	16,8	17,8	18,8	19,8	20,8

В отличие от главных понизительных подстанций, цеховые подстанции промышленных предприятий напряжением 10(6)/0,4 кВ не имеют устройств РПН. Такие подстанции позволяют регулировать напряжение в узком диапазоне посредством переключения без возбуждения (ПБВ). При установке УКРМ на стороне низшего напряжения цеховых подстанций либо на промежуточных распределительных пунктах напряжением 0,4 кВ важно обеспечить требуемые уровни напряжения у потребителей. Поэтому при выборе мощности УКРМ следует производить расчет

напряжений в электрической сети и проверку отклонений напряжения у потребителей в различных режимах нагрузки.

Отклонение напряжения у потребителя δU_{Π} , получающего питание по сети 0,4 кВ, можно выразить через отклонение напряжения на шинах низшего напряжения главной понизительной подстанции $\delta U_{\text{НН}}$, надбавку напряжения трансформатора цеховой ТП 10(6)/0,4 кВ $\delta U_{\text{НБ}}$ и суммарную потерю напряжения в электрической сети напряжением 10(6) и 0,4 кВ ΔU

$$\delta U_{\Pi} = \delta U_{\text{НН}} + \delta U_{\text{НБ}} - \Delta U. \quad (4)$$

Потеря напряжения в электрической сети включает потери в основных ее элементах (линии высокого напряжения $\Delta U_{\text{ВЛ}}$, трансформаторе $\Delta U_{\text{Т}}$, линии низкого напряжения $\Delta U_{\text{НЛ}}$) и определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_{\text{ВЛ}} + \Delta U_{\text{Т}} + \Delta U_{\text{НЛ}} = \\ &= \frac{P_{\text{ВЛ}} R_{\text{ВЛ}} + Q_{\text{ВЛ}} X_{\text{ВЛ}}}{U_{\text{ВЛ}}} + \frac{P_{\text{Т}} R_{\text{Т}} + Q_{\text{Т}} X_{\text{Т}}}{U_{\text{Т}}} + \frac{P_{\text{НЛ}} R_{\text{НЛ}} + Q_{\text{НЛ}} X_{\text{НЛ}}}{U_{\text{НЛ}}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $P_{\text{ВЛ}}$, $Q_{\text{ВЛ}}$, $P_{\text{Т}}$, $Q_{\text{Т}}$, $P_{\text{НЛ}}$, $Q_{\text{НЛ}}$ – потоки активной и реактивной мощности в линии высокого напряжения, трансформаторе, линии низкого напряжения соответственно; $R_{\text{ВЛ}}$, $X_{\text{ВЛ}}$, $R_{\text{Т}}$, $X_{\text{Т}}$, $R_{\text{НЛ}}$, $X_{\text{НЛ}}$ – активное и реактивное сопротивление линии высокого напряжения, трансформатора, линии низкого напряжения соответственно; $U_{\text{ВЛ}}$, $U_{\text{Т}}$, $U_{\text{НЛ}}$ – напряжение линии высокого напряжения, обмотки высшего напряжения трансформатора, линии низкого напряжения соответственно.

При подключении УКРМ к шинам низшего напряжения подстанции уменьшаются потери напряжения в линии высокого напряжения и трансформаторе. Суммарная потеря напряжения в электрической сети

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{P_{\text{ВЛ}} R_{\text{ВЛ}} + (Q_{\text{ВЛ}} - Q_{\text{К}}) X_{\text{ВЛ}}}{U_{\text{ВЛ}}} + \\ &+ \frac{P_{\text{Т}} R_{\text{Т}} + (Q_{\text{Т}} - Q_{\text{К}}) X_{\text{Т}}}{U_{\text{Т}}} + \frac{P_{\text{НЛ}} R_{\text{НЛ}} + Q_{\text{НЛ}} X_{\text{НЛ}}}{U_{\text{НЛ}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом степени компенсации и коэффициента мощности нагрузки выражения для определения потери напряжения в сети и отклонения напряжения у потребителя можно представить в виде:

$$\Delta U = \frac{PR}{U^2} [1 + \text{tg}^2 \phi^2 (1 - C)]; \quad (7)$$

$$\delta U_{\Pi} = \delta U_{\text{НН}} + \delta U_{\text{НБ}} - \frac{PR}{U^2} [1 + \text{tg}^2 \phi^2 (1 - C)]. \quad (8)$$

Зависимости потери напряжения в сети от степени компенсации при различных значениях $\cos \phi$ нагрузки приведены на рис. 1. Как видно

из графиков, увеличение степени компенсации ведет к снижению потери напряжения, причем при более низком $\cos\varphi$ потеря напряжения уменьшается резче. Увеличение степени компенсации приводит к увеличению отклонения напряжения у потребителя. Если предположить, что допустимое отклонение напряжения у потребителя составляет $+5\% U_H$, то при $\cos\varphi = 0,7$ и надбавке трансформатора $\delta U_{\text{НБ}} = +5\%$ (рис. 2) обеспечить максимальную степень компенсации нельзя. Таким образом, $C = 1$ можно получить лишь при условии уменьшения величины надбавки трансформатора на одну ступень, в частности при $\delta U_{\text{НБ}} = +2,5\%$. При различном $\cos\varphi$ нагрузки отклонение напряжения у потребителя превышает допустимое значение при различных значениях степени компенсации (рис. 3). Если при $\cos\varphi = 0,7$ степень КРМ может приниматься равной 0,56, то при $\cos\varphi > 0,8$ КРМ в электрической сети в указанных условиях практически невозможна.

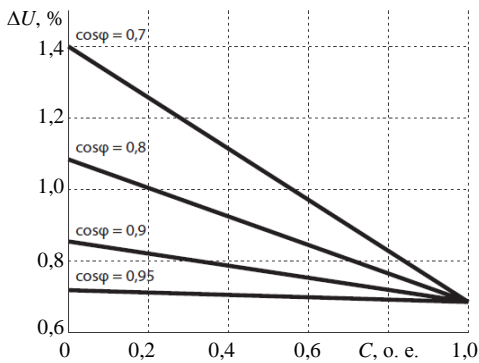


Рис. 1. Зависимость потери напряжения от степени компенсации при различных значениях $\cos\varphi$ нагрузки

Fig. 1. Dependence of the voltage loss on the degree of compensation for different values of the load $\cos\varphi$

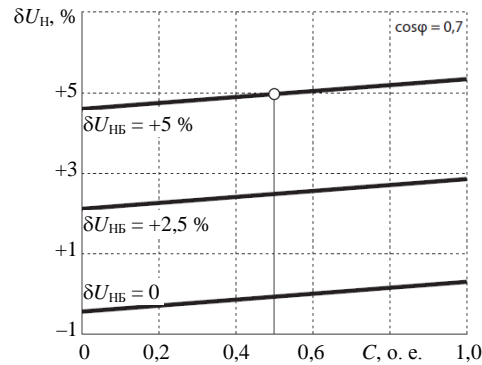


Рис. 2. Зависимость отклонения напряжения у потребителя от степени компенсации при различных надбавках трансформатора с переключением без возбуждения

Fig. 2. Dependence of the voltage deviation of the consumer on the degree of compensation for different surcharges of the transformer with switchover without excitation

При выборе требуемой мощности УКРМ в сетях с положительными отклонениями напряжения у потребителей нужно в первую очередь задействовать имеющиеся возможности регулирования напряжения за счет переключения надбавок трансформаторов с ПБВ. Если такой возможности нет (например, установлены минимальные надбавки трансформаторов), следует уменьшить мощность УКРМ, пусть и в ущерб эффективности компенсации реактивной мощности, но обеспечить требуемое качество напряжения у потребителя.

На практике зачастую регулирование напряжения на шинах трансформаторов с РПН осуществляется в ручном режиме. Подключенные к шинам подстанций УКРМ также чаще всего управляются вручную. В ряде случаев

применяются локальные устройства автоматического управления РПН трансформатора и регулируемой УКРМ, функционирующие независимо друг от друга.

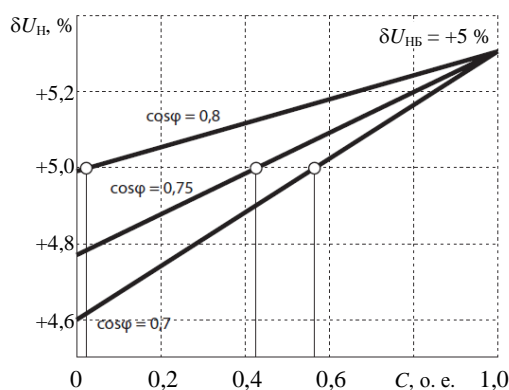


Рис. 3. Зависимость отклонения напряжения у потребителя от степени компенсации при различных значениях $\cos\varphi$ нагрузки

Fig. 3. Dependence of the voltage deviation of the consumer on the degree of compensation for different values of the load $\cos\varphi$

Ни один из указанных способов управления не позволяет обеспечивать эффективные режимы регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях предприятий. Для решения указанной задачи перспективным видится применение предложенных авторами многофункциональных устройств управления оборудованием трансформаторной подстанции с автоматическим регулированием напряжения и компенсации реактивной мощности, а также поддержания управляющих связей с более высоким уровнем энергосистемы [4–9]. Подходы и опыт решения указанных задач подробно изложены в предыдущих статьях авторов [10–17].

ВЫВОДЫ

1. Увеличение объемов потребления электроэнергии промышленными и сельскохозяйственными предприятиями, электрифицированным транспортом и пр., обусловленное вводом в действие генерирующих мощностей Белорусской АЭС и ее интеграцией в баланс энергосистемы, неизбежно потребует повышения пропускной способности электрических сетей энергосистемы и промышленных предприятий, особенно сетей и подстанций напряжением 110 кВ и ниже. При решении данной задачи стоит рассмотреть возможности, предоставляемые компенсацией реактивной мощности (наиболее быстрый в реализации и дешевый способ).

2. Система электроснабжения промышленного предприятия, включающая сети до 1 кВ, а также сети и подстанции напряжением 6, 10 кВ и выше, представляет собой единое целое, и правильно определить режимы компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения можно только при совместном решении указанных задач на всех ее уровнях. Всегда следует стремиться к достижению наибольшей экономичности функцио-

нирования системы электроснабжения, но при этом для обеспечения требуемого качества напряжения у потребителей необходимо учитывать ограничения при выборе параметров устройств компенсации реактивной мощности и определении режимов работы устройств регулирования напряжения.

3. При выборе параметров и режимов работы устройств компенсации реактивной мощности на главных понизительных подстанциях напряжением 110/35/10(6) кВ, оборудованных трансформаторами с устройством регулирования напряжения под нагрузкой и реализующих встречное регулирование напряжения, следует принимать степень компенсации реактивной мощности равной или близкой к 1, что обеспечит минимальный уровень потребления реактивной мощности из внешней сети. При этом диапазон регулирования напряжения под нагрузкой следует принимать исходя из установленной степени компенсации.

4. При выборе параметров и режимов работы устройств компенсации реактивной мощности на подстанциях напряжением 10(6)/0,4 кВ, не имеющих устройств встречного регулирования напряжения, нужно учитывать возможности снижения напряжения за счет переключения надбавок трансформаторов с переключением без возбуждения. При положительных отклонениях напряжения и установленных минимальных надбавках трансформаторов следует ограничивать мощность устройств компенсации реактивной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко, И. В. Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии / И. В. Жежеленко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35>.
2. Бугаева, Т. М. Современные методы планирования энергосистемы города / Т. М. Бугаева, О. В. Новикова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-377-387>.
3. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. Респ. Беларусь 01.04.2016. Минск: БелГИСС, 2016.
4. Счастный, В. П. Об эффективности функционирования комплекса технических средств в электрических сетях 0,38 кВ сельскохозяйственных объектов / В. П. Счастный // Агропанорама. 2008. № 5. С. 24–27.
5. Устройство для управления оборудованием трансформаторной подстанции: пат. 882 Респ. Беларусь / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич, А. И. Жуковский. Оpubл. 30.06.2003.
6. Устройство для управления оборудованием потребительской трансформаторной подстанции: пат. 4613 Респ. Беларусь / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич. Оpubл. 30.08.2008.
7. Устройство управления техническими средствами трансформаторной подстанции: пат. 4534 / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич, А. И. Жуковский. Оpubл. 30.08.2008.
8. Устройство для управления оборудованием двухтрансформаторной подстанции: пат. 5573 / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич. Оpubл. 30.10.2009.
9. Устройство для управления оборудованием трансформаторной подстанции, регистрации и архивации параметров и режимов электрической сети: пат. 4535 / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич. Оpubл. 30.08.2008.

10. Жуковский, А. И. Эффективность применения фильтрокомпенсирующих устройств на примере сталепроволочного цеха № 1 РУП «Белорусский металлургический завод» / А. И. Жуковский // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сент. 2007. Жлобин: ПО «БМЗ», 2007. С. 99–101.
11. Жуковский, А. И. Фильтрокомпенсирующие устройства для компенсации реактивной мощности и повышения качества электроэнергии в электрических сетях металлургических предприятий / А. И. Жуковский // Металлургия и литейное производство 2007. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сент. 2007. Жлобин: ПО «БМЗ», 2007. С. 118–120.
12. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности. Проблемы и решения / А. И. Жуковский // Энергия и Менеджмент. 2007. № 3. С. 30–33.
13. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // Энергия и Менеджмент. 2008. № 3. С. 38–42.
14. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский, В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // Энергия и Менеджмент. 2013. № 4–5. С. 23–26.
15. Жуковский, А. И. К вопросу о проектировании компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // Энергия и Менеджмент. 2015. № 2. С. 20–30.
16. Счастный, В. П. Устройство управления оборудованием двухтрансформаторной подстанции при параллельной работе трансформаторов / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БГАТУ, 2019. С. 55–58.
17. Счастный, В. П. Особенности выбора установок компенсации реактивной мощности / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. Минск: БГАТУ, 2019. Ч. 1. С. 393–394.

Поступила 21.10.2020 Подписана в печать 05.01.2021 Опубликовано онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V. (2018) The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35> (in Russian).
2. Bugaeva T. M., Novikova O. V. (2019) Modern Methods of Urban Energy System Planning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-377-387> (in Russian).
3. State Standart 32144–2013. *Electric Power. The Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Quality Standards of Electricity in General-Purpose Electricity Systems*. Minsk, BelGISS Publ. 2016 (in Russian).
4. Schasny V. P. (2008) On the Effectiveness of Operation of the Complex of Technical Means in Electrical Networks of 0.38 kV Agricultural Facilities. *Agropanorama*, (5), 24–27 (in Russian).
5. Schasny V. P., Zeliankevich A. I., Zhukouski A. I. (2003) *Device for the Control of the Equipment of the Transformer Substation*. Patent No 882 Republic of Belarus (in Russian).
6. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2008) *Device for the Control of the Equipment of the Consumer Transformer Substation*. Patent No 4613 Republic of Belarus (in Russian).

7. Schasny V. P., Zeliankevich A. I., Zhukouski A. I. (2008) *Device for the Control of the Means of Transformer Substation*. Patent No 4534 Republic of Belarus (in Russian).
8. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2009) *Device for the Control of the Equipment of the Two-Transformer Substation*. Patent No 5573 Republic of Belarus (in Russian).
9. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2008) *Device for the Control of the Equipment of the Transformer Substation, Registration and Archiving of Parameters and Modes of the Electrical Network*. Patent No 4535 Republic of Belarus (in Russian).
10. Zhukouski A. I. (2007) Efficiency of the Use of Filtration-Compensating Devices on the Example of the Steel Wire Workshop No 1 of the Belarusian Steel Works. *Metallurgiya i Liteinoe Proizvodstvo 2007. Belarus': Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Zhlobin, 6–7 Sent. 2007* [Metallurgy and Foundry Production 2007. Belarus: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Zhlobin, Sept. 6–7, 2007]. Zhlobin, Belarusian Steel Works Industry Association, 99–101 (in Russian).
11. Zhukouski A. I. (2007) Filter-Compensating Devices to Compensate for Reactive Power and Improve the Quality of Electricity in the Electrical Networks of Steel Mills. *Metallurgiya i Liteinoe Proizvodstvo 2007. Belarus': Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Zhlobin, 6–7 Sent. 2007* [Metallurgy and Foundry Production 2007. Belarus: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Zhlobin, Sept. 6–7, 2007]. Zhlobin, Belarusian Steel Works Industry Association, 118–120 (in Russian).
12. Zhukouski A. I. (2007) Reactor Power Compensation. Problems and Solutions. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 30–33 (in Russian).
13. Zhukouski A. I. (2008) Compensation of Reactive Power and Improving the Quality of Electricity in the Electrical Grids of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 38–42 (in Russian).
14. Zhukouski A. I., Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2013) Compensation of Reactive Power in Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4–5), 23–26 (in Russian).
15. Zhukouski A. I. (2015) Towards the Problem of the Design of Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (2), 20–30 (in Russian).
16. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2019) Equipment Control Device of Two-Transformer Substation in Conditions of Parallel Operation of Transformers. *Energoberezhenie – Vazhmeishee Uslovie Innovatsionnogo Razvitiya APK: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Energy Conservation as the Most Important Condition for the Innovative Development of the AIC: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, BSATU Publ. 55–58 (in Russian).
17. Schasny V. P., Zeliankevich A. I. (2019) Specific Features of the Selection of Jet Power Compensation Plants. *Tekhnicheskoe i Kadrovoe Obespechenie Innovatsionnykh Tekhnologii v Sel'skom Khozyaistve: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Ch. 1* [Technical and Human Resources Provision of Innovative Technologies in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Part 1]. Minsk, BSATU Publ. 393–394 (in Russian).