

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ

Научная статья

Платонова Е.В.^{1,*}, Колковский А.В.², Торопов А.С.³, Метелев В.А.⁴
^{1, 2, 3, 4} Сибирский федеральный университет, Абакан, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (eplatonova[at]yandex.ru)

Аннотация

Работа направлена на решение актуальной задачи обеспечения качества напряжения при параллельной работе потребителей с нелинейной нагрузкой и устройств компенсации реактивной мощности.

В экспериментальной части работы представлены результаты инструментальных измерений в течение суток таких показателей, как отклонения фазных напряжений, потребление активной и реактивной мощности, коэффициент несинусоидальности напряжения, а также спектральный состав напряжения на примере одного из крупных угледобывающих предприятий Республики Хакасия. Режимы работы системы электроснабжения рассматриваемого объекта были смоделированы в программном комплексе RastrWin. Моделирование показало, что для повышения качества напряжения на предприятии недостаточно только регулирования напряжения посредством РПН трансформаторов на подстанции, и требуется повышение коэффициента мощности как в режиме минимальной, так и в режиме максимальной нагрузки. Для повышения коэффициента мощности предложено задействовать устройства компенсации реактивной мощности со ступенчатым управлением режимами их работы.

Выбор устройств компенсации реактивной мощности был проведен на основе анализа частотных характеристик входного сопротивления сети относительно шин подключения этих устройств. Анализ показал, что работа незащищенных реактором конденсаторных батарей невозможна ввиду их перегрузки значительными токами высших гармоник, и целесообразно подключение имеющихся фильтрокомпенсирующих устройств с целью повышения коэффициента мощности, регулирования напряжения, снижения потерь мощности и электроэнергии в сети и улучшения качества электроэнергии по критерию несинусоидальности.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, отклонение напряжения, несинусоидальность напряжения.

APPLICATION OF FILTER COMPENSATING DEVICES TO IMPROVE VOLTAGE QUALITY AT COAL MINES

Research article

Platonova Y.V.^{1,*}, Kolovskii A.V.², Toropov A.S.³, Metelev V.A.⁴
^{1, 2, 3, 4} Siberian Federal University, Abakan, Russian Federation

* Corresponding author (eplatonova[at]yandex.ru)

Abstract

The work is aimed at solving the urgent issue of voltage quality assurance during parallel operation of consumers with nonlinear load and reactive power compensation devices.

The experimental part of the work presents the results of instrumental measurements during a day of such parameters as deviations of phase voltages, active and reactive power consumption, voltage non-sinusoidality coefficient, as well as voltage spectral composition on the example of one of the large coal mining enterprises of the Republic of Khakassia. The operation modes of the power supply system of the subject facility were modelled in the RastrWin software package. Modelling has shown that to improve the voltage quality at the enterprise it is not enough only to regulate the voltage by means of on-load tap changing of transformers at the substation, and it is required to increase the power factor both in the minimum and maximum load modes. To increase the power factor, it was suggested to use reactive power compensation devices with step-by-step control of their operation modes.

The choice of reactive power compensation devices was made based on the analysis of frequency characteristics of the input impedance of the network relative to the connection busbars of these devices. The analysis showed that the operation of capacitor banks unprotected by a reactor is impossible due to their overload with significant currents of higher harmonics, and it is appropriate to connect the available filter compensating devices in order to increase the power factor, voltage regulation, reduce power and electricity losses in the network and improve the quality of electricity by the criterion of non-sinusoidality.

Keywords: reactive power compensation, voltage fluctuation, voltage non-sinusoidality.

Введение

Развитие угледобывающей отрасли в Республике Хакасия привело за последние 5-7 лет к росту числа и мощности угольных разрезов. Эксплуатация систем электроснабжения таких предприятий требует, во-первых, поддержания в них нормативных уровней напряжения и, во-вторых, ставит задачу обеспечения нормативного коэффициента несинусоидальности напряжения и уровней гармонических составляющих для соседних с разрезами потребителей. В составе нагрузок разрезов наиболее мощными являются привода экскаваторов, характеристики и режимы работы которых определяют показатели качества напряжения на шинах их подключения.

Объект исследования

В работе выполнено исследование качества напряжения одного из угольных разрезов Республики Хакасия. Электроснабжение предприятия осуществляется от подстанции 35/10 кВ, на которой установлены трансформаторы ТМН-4000/35/10 и ТМН-6300/35/10. От ячеек КРУН-10 кВ отходят линии, питающие не только нагрузку предприятия, но и сторонних потребителей (сельскохозяйственные объекты и жилые поселки). К основному оборудованию разреза

относятся экскаваторы Liebherr 9200r. Высоковольтные синхронные двигатели отсутствуют. Все электродвигатели до 1 кВ мощностью от 30 кВт и выше оборудованы преобразователями частоты, электродвигатели выше 1 кВ оборудованы устройствами плавного пуска. В соответствии с проектом на шинах 10 кВ подстанции были установлены фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) марки УКРМФ-10,5-350-100УХЛ4 и УКРМФ-10,5-600-100 УХЛ4 с возможностью ступенчатого регулирования реактивной мощности, которые на предприятии не используются и находятся в отключенном состоянии. Для обеспечения успешной работы ФКУ был проведен предварительный анализ графиков электрических нагрузок предприятия, анализ изменения коэффициента мощности в зависимости от режима нагрузки, а также анализ параметров качества напряжения по критериям отклонения напряжения и коэффициенту несинусоидальности напряжения. Такой анализ необходим для выбора правильного алгоритма регулирования мощности ФКУ в течение суток для их эффективной и надежной работы.

Результаты суточных замеров отклонений напряжения и соответствующих им потреблений активной и реактивной мощности, выполненные на шинах 10 кВ предприятия, представлены на рисунках 1 и 2.

На приведенных графиках явно прослеживаются значительные отклонения напряжения, соответствующие снижению нагрузки в периоды смены бригад, обслуживающих экскаваторы (режимы минимальной нагрузки). Такие отклонения напряжения крайне неблагоприятно сказываются на показателях качества электроэнергии у присоединенных к подстанции предприятия сторонних потребителей. Продолжительность режимов минимальной нагрузки составляет 16-18% от суточного времени.

Коэффициент мощности в режимах наибольшей нагрузки меняется от 0,76 до 0,85. Коэффициент мощности в режимах минимальной нагрузки лежит в диапазоне от 0,45 до 0,8. В этих режимах также наблюдается повышение в 3 раза коэффициента несинусоидальности напряжения. Спектр гармоник представлен на рисунке 3.

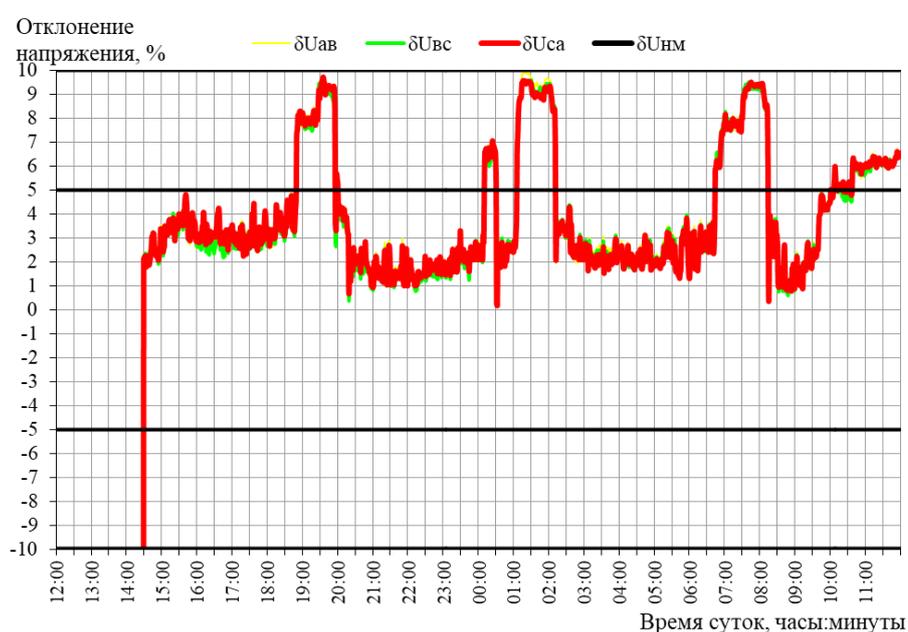


Рисунок 1 - График отклонений фазных напряжений

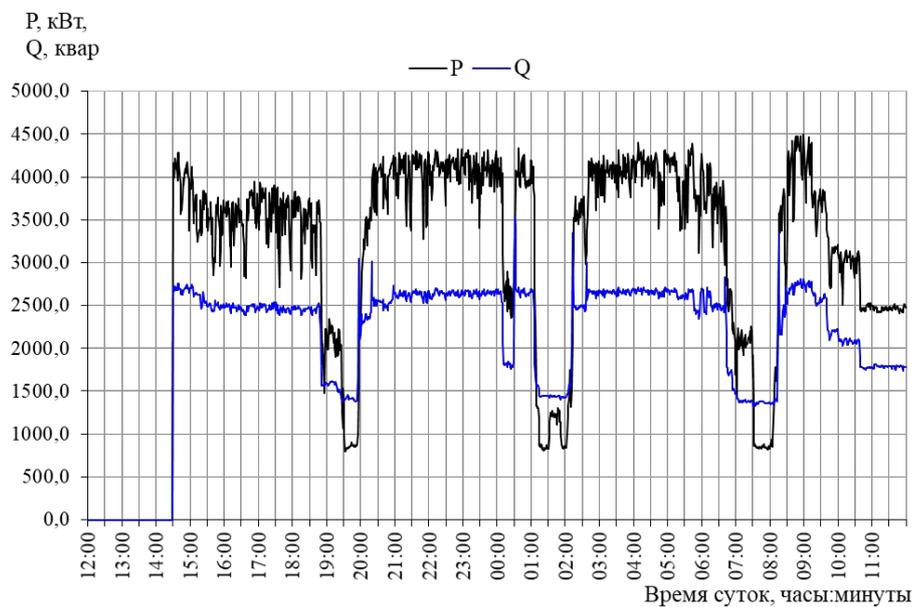


Рисунок 2 - Графики активной и реактивной трехфазной мощности

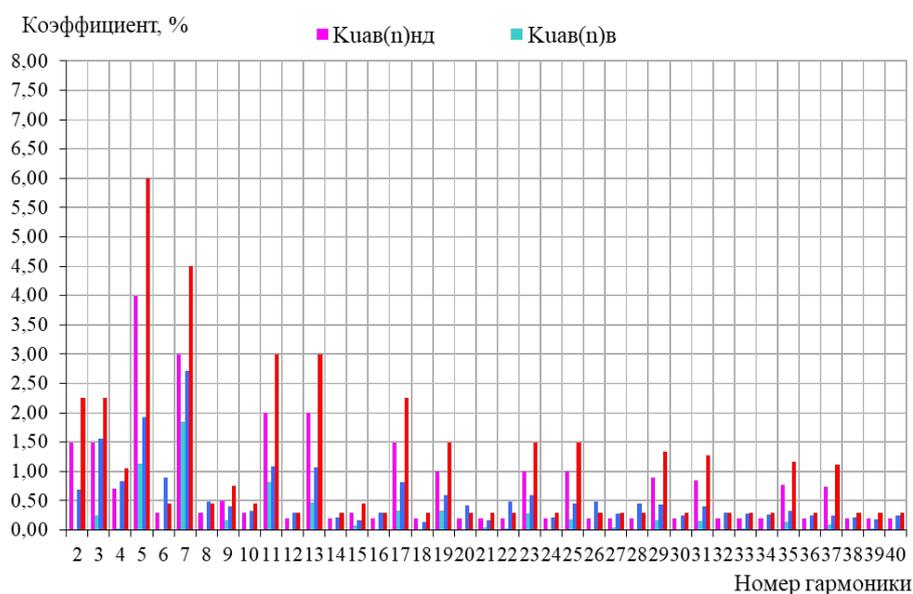


Рисунок 3 - Коэффициенты p-х гармонических составляющих линейного напряжения

Анализ результатов проведенных инструментальных измерений позволяет сделать следующие выводы:

1. На предприятии не производится суточное автоматическое регулирование напряжения посредством РПН трансформаторов на подстанции;
2. Требуется мероприятия по повышению коэффициента мощности как в режиме минимальной, так и в режиме максимальной нагрузки;
3. Эксплуатация фильтрокомпенсирующих устройств, установленных на подстанции с целью повышения коэффициента мощности, будет возможна при условии автоматического регулирования настройки фильтров.

Методы исследования

С целью анализа характерных режимов совместной работы устройства РПН трансформатора и устройства компенсации реактивной мощности была разработана модель сети в программном комплексе RastrWin [1].

По результатам анализа были предложены меры, позволяющие обеспечить отклонение напряжения на шинах подключения потребителей (шины 10 кВ подстанции) в соответствии с требованиями ГОСТ на качество электроэнергии [2], [3], [4], [5].

Расчеты, выполненные на модели, показали, что регулирование напряжения посредством РПН трансформатора является недостаточным ввиду значительных отклонений напряжения при изменениях нагрузки, если устройства компенсации реактивной мощности отключены. В режимах минимальной нагрузки требуется задействовать полную, а в режимах наибольших нагрузок неполную мощность компенсирующих устройств. То есть целесообразной является совместная работа РПН и компенсирующих устройств, а ввиду того, что нагрузка является резкопеременной, следует рассмотреть вопрос об автоматическом регулировании мощности этих устройств.

Однако несинусоидальность напряжения, обусловленная нелинейностью нагрузки, предъявляет особые требования к выбору типа, состава и мощности устройств компенсации реактивной мощности. Особенности выбора устройств компенсации реактивной мощности в системах с нелинейными нагрузками рассматривались в работах [6], [7].

Как уже было сказано, на подстанции установлены фильтрокомпенсирующие устройства УКРМФ-10,5-350-100УХЛ4 и УКРМФ-10,5-600-100 УХЛ4, в состав которых входят фильтры, настроенные на пятую и седьмую гармоники.

Анализ возможных режимов работы устройств компенсации реактивной мощности проводился путем построения частотных характеристик (ЧХ) входного сопротивления сети относительно шин 10 кВ подстанции, на которых эти устройства устанавливаются. ЧХ рассчитывались без учета активных сопротивлений элементов сети.

В случае подключения на шины 10 кВ незащищенной реактором конденсаторной батареи (КБ) формула для расчета входного сопротивления имеет вид:

$$X_{BX(\nu)} = \frac{X_{сети} * X_{КБ} * \nu}{X_{сети} * \nu^2 - X_{КБ}} \quad (1)$$

где:

$X_{сети}$ – сопротивление питающей сети;

$X_{КБ}$ – сопротивление КБ;

ν – номер гармоники.

В случае подключения на шины 10 кВ одного фильтрового звена (ФКУ), настроенного на 5-ю или на 7-ю гармоники формула для расчета входного сопротивления имеет вид:

$$X_{BX(\nu)} = \frac{X_{сети} * \nu * (X_{реакт} * \nu^2 - X_{КБ})}{\nu^2 * (X_{сети} + X_{реакт}) - X_{КБ}} \quad (2)$$

где:

$X_{сети}$ – сопротивление сети;

$X_{реакт}$ – сопротивление реактора;

$X_{КБ}$ – сопротивление КБ;

ν – номер гармоники.

В случае подключения на шины 10 кВ двух фильтровых звеньев, настроенных на 5-ю и на 7-ю гармоники формула для расчета сопротивления эквивалентного фильтрового звена имеет вид:

$$X_{\phi \text{ экв } (\nu)} = \frac{X_{p5} * X_{p7} * \nu^2 + \left(\frac{X_{КБ5} * X_{КБ7}}{\nu^2} \right) - X_{КБ5} * X_{p7} - X_{КБ7} * X_{p5}}{X_{p5} * \nu - \left(\frac{X_{КБ5}}{\nu} \right) + X_{p7} * \nu - \left(\frac{X_{КБ7}}{\nu} \right)} \quad (3)$$

где:

$X_{сети}$ – сопротивление сети;

X_{p5} и $X_{КБ5}$ – сопротивления реактора и КБ фильтра 5-й гармоники;

X_{p7} и $X_{КБ7}$ – сопротивления реактора и КБ фильтра 7-й гармоники.

Формула для расчета входного сопротивления имеет вид:

$$X_{BX(\nu)} = \frac{X_{сети} * \nu * X_{\phi \text{ экв } \nu}}{X_{сети} * \nu + X_{\phi \text{ экв } \nu}} \quad (4)$$

Вопросы анализа режимов работы электрической сети с использованием ЧХ входных сопротивлений рассматривались в работах [8], [9], [10].

Основные результаты

Были рассчитаны и проанализированы ЧХ входных сопротивлений для случаев ступенчатого регулирования мощности как незащищенной конденсаторной батареи, так и для вариантов ступенчатого регулирования мощности ФКУ. Результаты расчетов ЧХ входных сопротивлений приведены на рисунках 4 и 5 в виде диаграмм. ЧХ входных сопротивлений на рисунке 4 рассчитаны для случаев подключения на шины 10 кВ нагрузки незащищенных реактором КБ разной мощности. Анализ ЧХ показывает, что при подключении одной КБ мощностью 350 кВАр имеют место резонансные усиления 7-й гармоники напряжения в 8 раз (это составит 36% от напряжения основной частоты) и 5-й гармоники напряжения в 2 раза (это составит 12% от напряжения основной частоты). При подключении одной КБ мощностью 600 кВАр имеют место резонансные усиления 7-й гармоники напряжения в 2 раза (это составит 9% от напряжения основной частоты) и 5-й гармоники напряжения в 4,5 раз (это составит 27% от напряжения основной частоты). При параллельном подключении обеих КБ (суммарная генерируемая мощность составит 950 кВАр) имеет место резонансное усиление 5-й гармоники напряжения в 7 раз (это составит 42% от напряжения основной частоты).

Таким образом, работа незащищенных реактором КБ невозможна ввиду их перегрузки значительными токами высших гармоник, и целесообразно подключение имеющихся ФКУ целью повышения коэффициента мощности, регулирования напряжения и снижения потерь мощности и электроэнергии в сети.

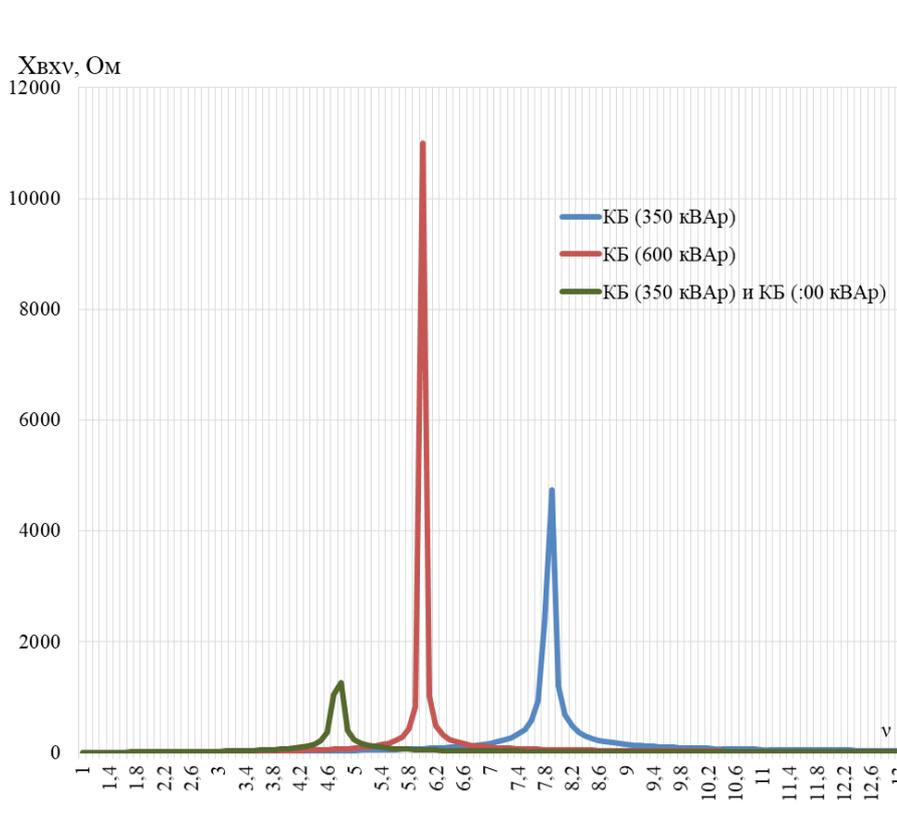


Рисунок 4 - ЧХ входных сопротивлений при подключении КБ

ЧХ входных сопротивлений, представленные на рисунке 5 рассчитаны для случаев подключения на шины 10 кВ нагрузки ФКУ различной мощности.

По результатам расчетов можно сделать вывод об отсутствии 5-й и 7-й гармоник в спектре напряжения при любых мощностях ФКУ. При этом полюса ЧХ входного сопротивления не совпадают ни с одной из канонических гармоник и, следовательно, их резонансные усиления исключены. Подключение ступеней ФКУ можно производить в соответствии с графиком электрических нагрузок в любом сочетании. Регулирование мощности ФКУ может быть автоматическим.

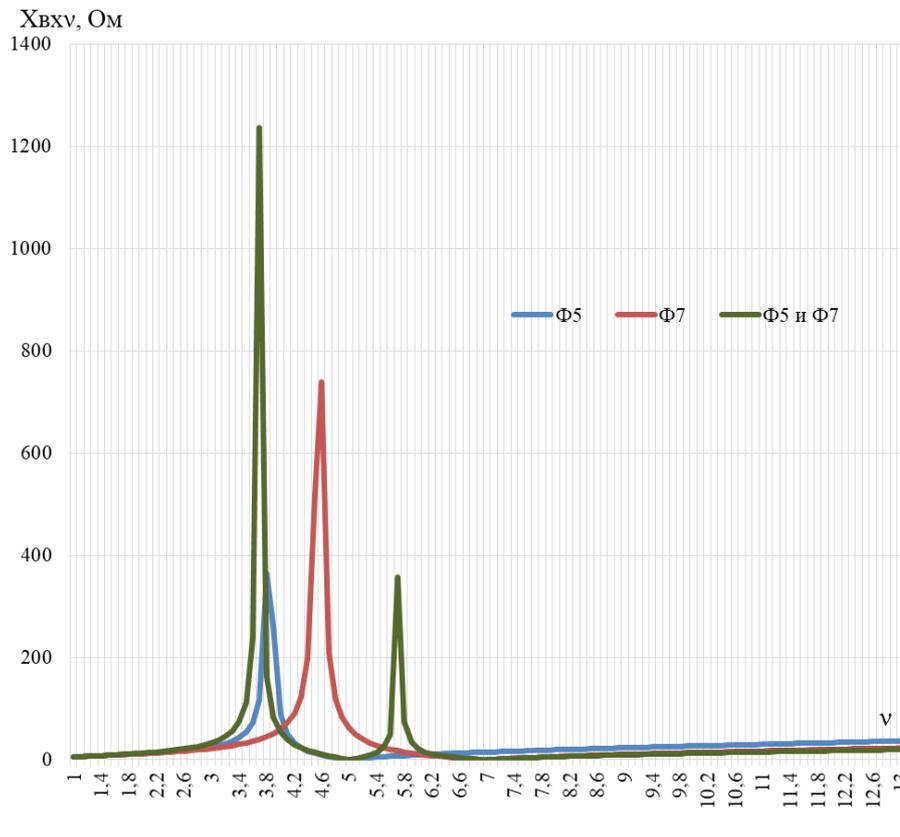


Рисунок 5 - ЧХ входных сопротивлений при подключении ФКУ

Заключение

Инструментальные замеры показателей качества напряжения показали значительные отклонения напряжения, несинусоидальность напряжения и снижение коэффициента мощности в период минимальной нагрузки потребителя.

Моделирование в программном комплексе RastrWin основных режимов работы системы электроснабжения потребителя позволило выявить недостаточность диапазона регулирования напряжения с помощью РПН трансформаторов.

По результатам анализа ЧХ входного сопротивления сети относительно шин 10 кВ питающей подстанции было предложено задействовать на подстанции ступенчато регулируемое ФКУ, в состав которого входят фильтры 5-й и 7-й гармоник. Ожидаемых резонансных усилений гармоник напряжения при подключении ФКУ не было выявлено.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Программный комплекс RastrWin. — URL: <http://www.rastrwin.ru/> (дата обращения: 14.05.23).
2. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Введ. 2013-03-25. — Москва: Стандартинформ, 2013. — 20 с.
3. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю.С. Железко. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 224 с.
4. Василенко Н.Е. Оптимизация электрической сети по реактивной мощности / Н.Е. Василенко, В.В. Плотников // Потенциал современной науки. — 2016. — № 4. — С. 23-31.
5. Тарабин И.В. Компенсация реактивной мощности как метод повышения качества электрической энергии и сокращения потерь на примере данных «МРСК СИБИРИ» / И.В. Тарабин, Р.Б. Скоков, И.А. Терехин // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2-22. — С. 4876-4879.
6. Платонова Е.В. Компенсация реактивной мощности в сетях с нелинейной нагрузкой / Е.В. Платонова, А.А. Минина, В.И. Пантелеев // Материалы докладов XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (5-7 декабря 2012 г.). — Томск, 2012. — С. 199-201.

7. Платонова Е.В. Методика выбора параметров средств компенсации реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока / Е.В. Платонова, А.А. Минина, В.И. Пантелеев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. — 2013. — № 1(47). — С. 59-63.

8. Платонова Е.В. Анализ несинусоидальных режимов Саяногорского узла Хакасской энергосистемы / Е.В. Платонова, Я.А. Алахтаев // Современные фундаментальные и прикладные исследования. — 2012. — № 4(7). — С. 63-70.

9. Платонова Е.В. Допустимая нагрузка батарей статических конденсаторов токами высших гармоник / Е.В. Платонова, Я.А. Алахтаев, А.А. Минина // Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции «Современные трансформационные экономические и социально-политические процессы» (23-25 мая 2013 г.). — Абакан, 2013. — С. 247-250.

10. Платонова Е.В. Резонансные режимы в узлах Хакасской энергосистемы / Е.В. Платонова, Я.А. Алахтаев // Труды XIII Международной молодежной научной конференции «Интеллект и наука» (16-18 апреля 2013 г.). — Железногорск, 2013. — С. 142-143.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Programmnyj kompleks RastrWin [Software complex RastrWin]. — URL: <http://www.rastrwin.ru/> (accessed: 14.05.23). [in Russian]

2. GOST 32144-2013. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Standards for the Quality of Electrical Energy in General-Purpose Power Supply Systems]. — Introduced 2013-03-25. — Moscow: Standartinform, 2013. — 20 p. [in Russian]

3. Zhelezko Yu.S. Kompensaciya reaktivnoj moshchnosti i povyshenie kachestva elektroenergii [Reactive Power Compensation and Improving the Quality of Electricity] / Yu.S. Zhelezko. — M.: Energoatomizdat, 1985. — 224 p. [in Russian]

4. Vasilenko N.E. Optimizaciya elektricheskoy seti po reaktivnoj moshchnosti [Optimization of the Electrical Network by Reactive Power] / N.E. Vasilenko, V.V. Plotnikov // Potencial sovremennoj nauki [Potential of Modern Science]. — 2016. — № 4. — P. 23-31. [in Russian]

5. Tarabin I.V. Kompensaciya reaktivnoj moshchnosti kak metod povysheniya kachestva elektricheskoy energii i sokrashcheniya poter' na primere dannyh «MRSK SIBIRI» [Reactive Power Compensation as a Method of Improving the Quality of Electrical Energy and Reducing Losses on the Example of IDGC of SIBERIA Data] / I.V. Tarabin, R.B. Skokov, I.A. Terekhin // Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental Research]. — 2015. — № 2-22. — P. 4876-4879. [in Russian]

6. Platonova E.V. Kompensaciya reaktivnoj moshchnosti v setyah s nelinejnoy nagruzkoy [Reactive Power Compensation in Networks with Nonlinear Load] / E.V. Platonova, A.A. Minina, V.I. Panteleev // Materialy dokladov XVIII Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost'» (5-7 dekabrya 2012 g.) [Materials of reports of the XVIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Power Engineering: Efficiency, Reliability, Safety" (December 5-7, 2012)]. — Tomsk, 2012. — P. 199-201. [in Russian]

7. Platonova E.V. Metodika vybora parametrov sredstv kompensacii reaktivnoj moshchnosti v tyagovyh setyah peremennogo toka [Methodology for Selecting Parameters of Reactive Power Compensation Means in AC Traction Networks] / E.V. Platonova, A.A. Minina, V.I. Panteleev // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev]. — 2013. — № 1(47). — P. 59-63. [in Russian]

8. Platonova E.V. Analiz nesinusoidal'nyh rezhimov Sayanogorskogo uzla Hakasskoj energosistemy [Analysis of Non-Sinusoidal Modes of the Sayanogorsk Node of the Khakass Power System] / E.V. Platonova, Ya.A. Alakhtaev // Sovremennye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya [Modern Fundamental and Applied Research]. — 2012. — № 4(7). — P. 63-70. [in Russian]

9. Platonova E.V. Dopustimaya zagruzka batarej staticheskikh kondensatorov tokami vysshih garmonik [Permissible Loading of Batteries of Static Capacitors with Currents of Higher Harmonics] / E.V. Platonova, Ya.A. Alakhtaev, A.A. Minina // Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye transformacionnye ekonomicheskie i social'no-politicheskie processy» (23-25 maya 2013 g.) [Abstracts of the IV International Scientific and Practical Conference "Modern Transformational Economic and Socio-Political Processes" (May 23-25, 2013)]. — Abakan, 2013. — P. 247-250. [in Russian]

10. Platonova E.V. Rezonansnye rezhimy v uzлах Hakasskoj energosistemy [Resonant Modes in the Nodes of the Khakass Power System] / E.V. Platonova, Ya.A. Alakhtaev // Trudy XIII Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii «Интеллект и наука» (16-18 aprelya 2013 g.) [Proceedings of the XIII International Youth Scientific Conference "Intelligence and Science" (April 16-18, 2013)]. — Zheleznogorsk, 2013. — P. 142-143. [in Russian]