

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.85>

## РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С НЕОДНОРОДНЫМИ НАГРУЗКАМИ

Научная статья

Платонова Е.В.<sup>1,\*</sup>, Коловский А.В.<sup>2</sup>, Торопов А.С.<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Сибирский федеральный университет, Абакан, Российская Федерация

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

### Аннотация

Работа направлена на решение актуальной задачи обеспечения оптимальных уровней напряжения в распределительных сетях электроэнергетических сетей среднего и низкого напряжения, в узлах которых имеет место совместная работа резкопеременной промышленной нагрузки и коммунально-бытовой нагрузки с относительно небольшими и плавными колебаниями в течение суток. В экспериментальной части работы представлены результаты инструментальных измерений в течение суток междуфазных напряжений на шинах низкого напряжения подстанции, нагрузка которой является типичной «коммунально-бытовой», а также суточный график изменения активной и реактивной мощностей на подстанции с резко-переменной промышленной нагрузкой (нагрузка мощного угольного разреза). Режимы работы системы электроснабжения рассматриваемого узла энергосистемы были смоделированы в программном комплексе RastrWin. Моделирование показало, что для нормализации напряжения в узлах нагрузки подстанций, питающих коммунально-бытовую нагрузку, обязательно автоматическое управление коэффициентами трансформации на этих подстанциях совместно с решением вопроса о применении устройств компенсации реактивной мощности.

**Ключевые слова:** распределительные электрические сети, резкопеременная нагрузка, коммунально-бытовая нагрузка, регулирование напряжения, коэффициент трансформации.

## VOLTAGE REGULATION IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH NONUNIFORM LOADS

Research article

Platonova Y.V.<sup>1,\*</sup>, Kolovskii A.V.<sup>2</sup>, Toropov A.S.<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Siberian Federal University, Abakan, Russian Federation

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

### Abstract

The work is aimed at solving the topical problem of ensuring optimal voltage levels in the distribution networks of medium and low voltage power networks, in the nodes of which there is a joint operation of abruptly variable industrial load and utility load with relatively small and smooth fluctuations during the day. The experimental part of the paper presents the results of instrumental measurements during the day of phase-to-phase voltages on the low-voltage busbars of the substation, the load of which is a typical 'municipal-domestic load', as well as the daily schedule of changes in active and reactive power at the substation with abruptly variable industrial load (load of a powerful coal mine). The operation modes of the power supply system of the reviewed node of the power system were modelled in the RastrWin software package. Modelling has shown that in order to normalize the voltage in the load nodes of substations supplying the municipal load, automatic control of transformation ratios at these substations is mandatory, together with a decision on the use of reactive power compensation devices.

**Keywords:** electric distribution network, abruptly variable load, utility load, voltage regulation, transformation ratio.

### Введение

Регулирование напряжения в распределительных сетях является основой повышения эффективности их работы и тесно связано с управлением балансами активной и реактивной мощности, что позволяет добиваться оптимального результата с точки зрения снижения потерь электроэнергии. Вопросам регулирования напряжения и уменьшения потерь электроэнергии за счёт применения различных методов регулирования активной и реактивной мощности посвящены работы [1], [2], [3]. Значительное количество работ посвящено развитию и применимости на практике современных активно-адаптивных устройств по регулированию параметров сети [4], [5].

Одним из подходов к управлению балансами активной и реактивной мощности является оптимальное применение компенсирующих устройств. Компенсация реактивной мощности не только нормализует уровни напряжения, но и снижает потери электроэнергии, увеличивает пропускную способность элементов сети, повышает надёжность ее функционирования, снижает затраты на строительство новых линий и подстанций при увеличении нагрузки потребителей. Эффективность воздействия компенсирующих устройств на сеть зависит от места их установки и мощности.

Другим подходом к управлению балансами активной и реактивной мощность в распределительных сетях является оптимальное регулирование напряжения, которое принято называть встречным. Встречное регулирование напряжения предполагает разработку и внедрение адаптивных алгоритмов регулирования напряжения, а также учет неопределенности, динамические изменения в распределительных сетях и другие факторы [6], [7], [8]. В условиях цифровизации электроэнергетики особенно актуально решение задач поиска способов автоматизации выбора

оптимальных коэффициентов трансформации посредством устройств регулирования под нагрузкой трансформаторов. Одним из ключевых элементов в управлении напряжением в распределительных сетях является оптимальное управление коэффициентом трансформации силовых трансформаторов. В условиях цифровизации энергетических объектов одним из научных направлений является разработка способов оптимизации и автоматизации регулирования напряжения с целью повышения энергетической эффективности работы распределительных сетей [9], [10].

Задача управления балансами активной и реактивной мощности особенно актуальна в распределительных электроэнергетических сетях среднего и низкого напряжения, в узлах которых имеет место совместная работа резкопеременной промышленной нагрузки и коммунально-бытовой нагрузки с относительно небольшими и плавными колебаниями в течение суток. Регулирование напряжения в таких узлах требует применения эффективных методов и алгоритмов, которые могли бы учитывать колебания нагрузки и поддерживать напряжение в заданных пределах. Нами был рассмотрен в качестве объекта исследования один из таких участков распределительной сети 35/10 кВ энергосистемы Республики Хакасия.

### Методы и принципы исследования

Методика оптимального регулирования напряжения включает в себя выбор числа, мощности и мест установки компенсирующих устройств и управление коэффициентами трансформации силовых трансформаторов.

Оптимизация режима по реактивной мощности выполняется для выбора модулей напряжения ( $V_i^T$ ) в узлах, которые могут являться источниками реактивной мощности, и коэффициентов трансформации ( $K_{ij}^T$ ) в трансформаторах, имеющих устройство регулирования под нагрузкой или вольтодобавочные трансформаторы. Обычно эти устройства используют для поддержания напряжений в заданных пределах:

$$V_i^{min} \leq V_t \leq V_i^{max} \quad (1)$$

и уменьшения потерь активной мощности. Решение этой задачи сводится к минимизации целевой функции:

$$\min F = \sum_{ij=1}^{N_v} \Delta P_{ij} + K_{ш} \sum_{i=1}^N \delta V_i^2 \quad (2)$$

где  $\Delta P_{ij}$  — потери активной мощности в ветви  $ij$ . Потери могут быть рассчитаны через модули и углы напряжений по концам ветви:

$$\Delta P_{ij} = \left( V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \right) g_{ij} \quad (3)$$

$N_v$  — число ветвей, по которым минимизируются потери. Это могут быть все или только выбранные ветви. Возможна ситуация, когда это число равно нулю, и в этом случае потери не минимизируются.

$N$  — количество узлов

$\delta V_i$  — нарушение ограничений (2), равное:

$$V_i = \begin{cases} \frac{V_i - V_i^{max}}{V_i^{max}} & \text{если } V_i \geq V_i^{max}; \\ 0 & \text{если } V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}; \\ \frac{V_i - V_i^{max}}{V_i^{max}} & \text{если } V_i \leq V_i^{min}, \end{cases} \quad (4)$$

$K_{ш}$  — штрафной коэффициент, подбирается эмпирически.

Минимизация функции потерь мощности осуществляется изменением:

- модулей напряжений и реактивной мощности в узлах-источниках реактивной мощности в заданных пределах:

$$Q_i^{min} \leq Q_i \leq Q_i^{max} \quad (5)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (6)$$

- коэффициентов трансформации в трансформаторах с ВДТ или РПН в заданных пределах:

$$K_{ij}^{T, min} \leq K_{ij}^T \leq K_{ij}^{T, max} \quad (7)$$

Для определения наилучших значений  $V_i$  и  $K_{ij}^T$  (независимые переменные) организуется итерационный процесс.

Модель рассматриваемого узла распределительной сети была реализована в программном комплексе RastrWin3.

### Основные результаты

В качестве объекта исследования был выбран участок распределительной сети Хакасской энергосистемы, включающий в себя три понизительные подстанции 35/10кВ, связанные воздушными линиями электропередачи. Схема сети приведена на рисунке 1. От подстанции «УР Майрыхский» питается угольный разрез, мощная нагрузка которого является резкопеременной в течение суток. Суточный график активной и реактивной нагрузки этого потребителя представлен на рисунке 2. Две другие подстанции питают сельские населённые пункты с преобладанием спокойной коммунально-бытовой нагрузки.

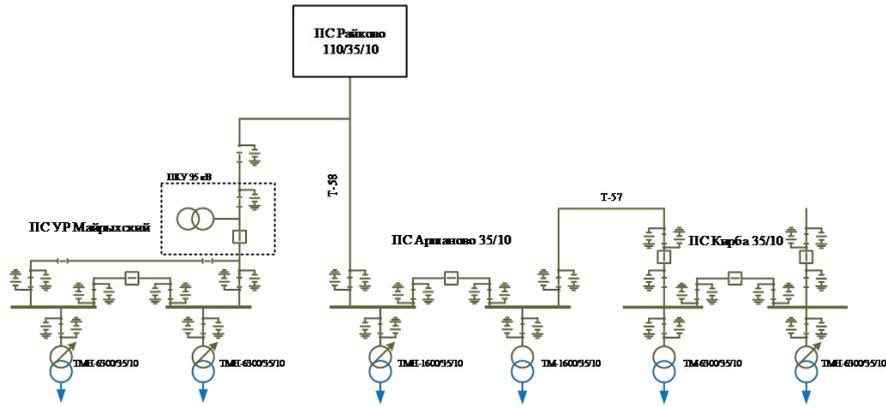


Рисунок 1 - Объект исследования  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.85.1>

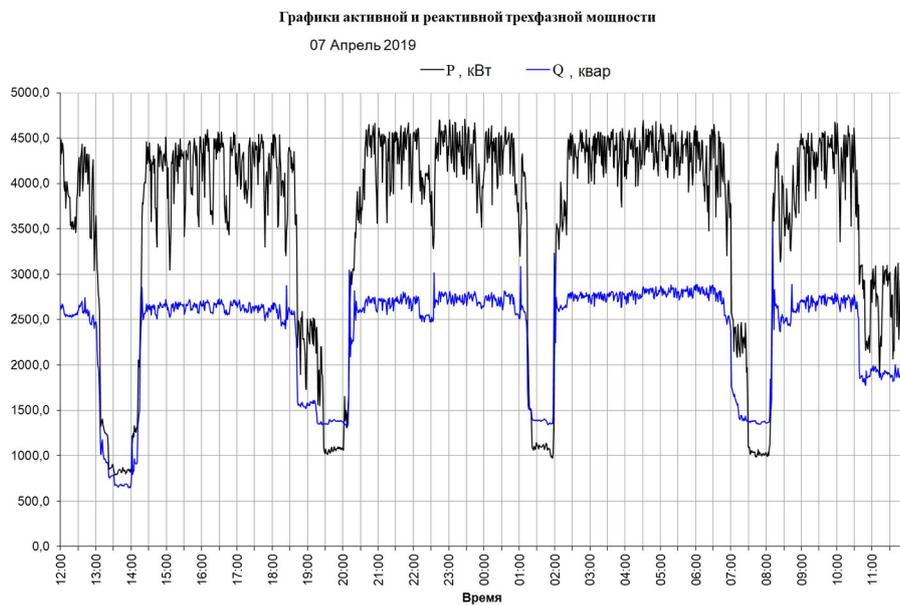


Рисунок 2 - Графики активной и реактивной нагрузки подстанции «УР Майрыхский»  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.85.2>

Проблемы с отклонениями напряжения имеют место в сети 0,4 кВ потребителей, питающихся от подстанции «Кирба». В режимах максимальной нагрузки на подстанции «УР Майрыхский» напряжения на шинах конечных потребителей, питающихся от подстанции «Кирба», снижаются до 0,32 кВ, т.е. на 10-15% ниже предельно допустимого (согласно ГОСТ 31244-2013) уровня. В режимах минимальной нагрузки напряжение возрастает до 0,42 кВ, т.е. на 10-12% превышает предельно допустимый (согласно ГОСТ 31244-2013) уровень. Такие отклонения напряжения крайне неблагоприятно сказываются на показателях качества электроэнергии у коммунально-бытовых потребителей. Продолжительность режимов минимальной нагрузки составляет 16-18% от суточного времени.

Результаты инструментальных измерений междуфазных напряжений, которые были выполнены на шинах 35 кВ подстанции «Кирба», представлены на рисунке 3.

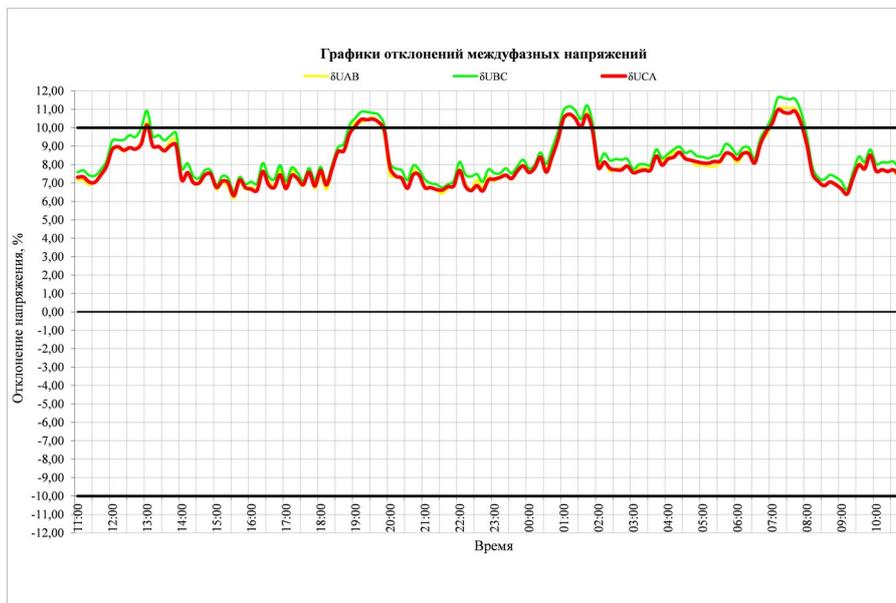


Рисунок 3 - Графики отклонений междуфазных напряжений на шинах 35 кВ подстанции «Кирба»  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.85.3>

На графиках рисунка 3 наблюдаются продолжительные скачки напряжения, совпадающие в определенные промежутки времени с периодами колебаний нагрузки на подстанции «УР Майрыхский», которые обусловлены технологическим простоем оборудования на разрезе. Аналогичные изменения междуфазных напряжений происходят и на подстанции «Аршаново».

На первом этапе оптимизационных расчетов для улучшения режима работы в рассматриваемом узле распределительной сети с целью поддержания допустимых уровней напряжения и снижения потерь с использованием модели в программном комплексе «RastrWin3» были определены оптимальные места установки и мощности компенсирующих устройств по критерию минимума целевой функции. В качестве устройств компенсации реактивной мощности можно предложить к установке батареи статических конденсаторов.

Следует отметить, на стороне 10 кВ ведомственной подстанции «УР Майрыхский» установлено четырехзвенное фильтрокомпенсирующее устройство, состоящее из двух фильтров, настроенных на 5-ю гармонику и двух фильтров, настроенных на 7-ю гармонику. Суммарная мощность фильтровых батарей составляет 0,1 МВАр. Однако, данное фильтрокомпенсирующее устройство в нормальной схеме отключено и используется только при запуске мощного оборудования потребителя. Результаты проведенных нами оптимизационных расчетов показали, что для обеспечения в режиме максимальной нагрузки номинальных уровней напряжения на шинах 35 кВ потребителей и для снижения потерь активной мощности в элементах рассматриваемого узла распределительной сети необходимо обеспечить постоянное включение по нормальной схеме фильтрокомпенсирующего устройства. При таких условиях на подстанции «Аршаново» и подстанции «Кирба» расчетное значение реактивной мощности, генерируемой предполагаемыми компенсирующими устройствами, по условиям оптимизации режима составило, соответственно, 0,8 МВАр и 2,5 МВАр. Анализ полученных результатов расчета позволил сделать следующие выводы.

- С учетом того, что нагрузка подстанции «УР Майрыхский» дает явно выраженные суточные и сезонные колебания активной и реактивной мощности, генерация реактивной мощности компенсирующими устройствами на должна уменьшаться в режимах минимальной нагрузки. Таким образом, применяемые батареи статических конденсаторов должны быть регулируемыми по мощности. Это существенно увеличивает затраты на их установку и эксплуатацию.

- Установка батарей статических конденсаторов позволит снизить потери активной мощности в сети напряжением 35 кВ режиме максимальной нагрузки на 2,17%.

- В период минимальных (летних) нагрузок компенсация реактивной мощности в рассматриваемом узле распределительной сети не требуется, так как нагрузки потребителей подстанции «УР Майрыхский» существенно ниже, чем в зимний период. При этом напряжение на шинах 35 кВ на подстанции «Аршаново» и подстанции «Кирба» недопустимо возрастает по сравнению с номинальным.

Таким образом, одна только компенсация реактивной мощности не решает полностью задачу регулирования напряжения в узлах рассматриваемого участка распределительной сети. Поэтому на втором этапе были проведены расчеты по выбору оптимальных коэффициентов трансформации силовых трансформаторов и стабилизации напряжения на фидерах 10 кВ, питающихся от подстанции «Кирба». Для выполнения расчетов на базе программного комплекса RastrWin3 была разработана комплексная модель рассматриваемого участка сети, в состав которой входят подстанции «Аршаново», «Кирба» и подстанция «УР Майрыхский», а также сети 10 кВ и 0,4 кВ, питающиеся от подстанции «Кирба».

По результатам оптимизационных расчетов получены приемлемые по условиям встречного регулирования уровни напряжения в любом из возможных режимов, имеющих место на каждой из рассматриваемых подстанций.

Совместное применение устройств компенсации реактивной мощности и устройств автоматического регулирования напряжения на трансформаторах подстанции «Аршаново» и подстанции «Кирба» позволяет поддерживать оптимальные уровни напряжения, полученные в результате проведения оптимизационных расчетов с использованием предложенной модели. Так, например, в режиме максимальной нагрузки подстанции «УР Майрыхский» оптимальное напряжение на 1-й секции шин подстанции «Кирба» составило 11,01 кВ, а на 2-й секции шин – 10,87 кВ. При минимальной нагрузке на подстанции «УР Майрыхский» оптимальное напряжение составило 10,6 кВ на 1-й секции шин подстанции «Кирба» и 10,1 кВ на 2-й секции шин этой подстанции. Компенсирующие устройства на всех рассматриваемых подстанциях в обоих режимах.

### Заключение

В работе были рассмотрены вопросы управления качеством электроэнергии по критерию отклонения напряжения. Для конкретного узла распределительной сети с коммунально-бытовой и мощной промышленной резкопеременной нагрузкой были определены оптимальные коэффициенты трансформации силовых трансформаторов при совместной работе устройств компенсации реактивной мощности и устройств автоматического регулирования напряжения. Анализ характерных режимов рассматриваемого узла сети показал, что компенсация реактивной мощности в рассматриваемом случае является недостаточным мероприятием, поэтому целесообразно применение устройств автоматического регулирования напряжения.

Использование устройств автоматического регулирования напряжения трансформаторов позволяет поддерживать стабильное напряжение в сети, предотвращая недопустимые отклонения напряжения у потребителей и снижая риск возникновения сбоев в работе электрооборудования. Одновременно с этим управление коэффициентом трансформации силовых трансформаторов способствует минимизации потерь электроэнергии и повышению энергетической эффективности распределительных сетей.

### 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. Кобец Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid: / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. — Москва: ИАЦ Энергия, 2010. — 208 с.
2. Шулькин Ю.А. Стратегия развития цифровой инфраструктуры при цифровизации предприятий электроэнергетического комплекса России / Ю.А. Шулькин, Е.Н. Лейман // Экономические науки. — 2024. — 2(23). — С. 217–222.
3. Бурман А.П. Перспективы применения в ЕЭС России гибких (управляемых) систем передачи переменного тока / А.П. Бурман, Ю.К. Розанов, Ю.Г. Шакарян // Электротехника. — 2004. — 8. — С. 30–37.
4. Веселов Ф.В. Интеллектуальная энергосистема России как новый этап развития электроэнергетики в условиях цифровой экономики / Ф.В. Веселов, В.В. Дорофеев // Энергетическая политика. — 2018. — 5. — С. 43–53.
5. Дорофеев В.В. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России / В.В. Дорофеев, А.А. Макаров // Энергоэксперт. — 2018. — 5. — с. 8–10.
6. Волошкин М.М. Управление коэффициентом силовых трансформаторов / М.М. Волошкин // Записки Горного института. — 2017. — Т. 152. — С. 158–160.
7. Нурбосынов Д.Н. Алгоритмы и математические модели автоматического изменения уставок РПН в режиме ONLINE / Д.Н. Нурбосынов, Т.В. Табачникова, А.В. Шарьгин // Информационные технологии. — 2016. — 6. — С. 129–133.
8. Жмак Е.И. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах на основе нечеткой логики : дис. ...канд. : 05.14.02 : защищена 2004-11-09 : утв. 2004-11-09 / Е.И. Жмак. — Новосибирск: 2004. — 120 с.
9. Непша Ф.С. Оценка эффективности оптимизации положений устройств встречного регулирования напряжения на примере электрических сетей филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Кузбассэнерго – РЭС» / Ф.С. Непша, А.А. Шевченко, В.В. Дабаров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2013. — 2(96). — С. 112–115.
10. Безбородов Д.С. Улучшение качества электроэнергии путем регулирования напряжения в электрических сетях / Д.С. Безбородов, Э.В. Кретов // Вестник магистратуры. — 2020. — 5-5(104). — С. 68–69.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kobets B.B. Innovatsionnoe razvitie elektroenergetiki na baze kontseptsii Smart Grid: [Innovative development of electric power industry based on the Smart Grid concept] / B.B. Kobets, I.O. Volkova. — Moskva: IATs Energija, 2010. — 208 p. [in Russian]
2. Shul'kin Ju.A. Strategija razvitija tsifrovoj infrastruktury pri tsifrovizatsii predpriyatij elektroenergeticheskogo kompleksa Rossii [Strategy for the development of digital infrastructure in the digitalization of enterprises of the electric power complex of Russia] / Ju.A. Shul'kin, E.N. Lejman // Economic Sciences. — 2024. — 2(23). — P. 217–222. [in Russian]

3. Burman A.P. Perspektivy primeneniya v EES Rossii gibkih (upravlyaemyh) sistem peredachi peremennogo toka [Prospects for the use of flexible (controlled) alternating current transmission systems in the Unified Energy System of Russia] / A.P. Burman, Ju.K. Rozanov, Ju.G. Shakarjan // *Electrical Engineering*. — 2004. — 8. — P. 30–37. [in Russian]
4. Veselov F.V. Intellektual'naja energosistema Rossii kak novyj etap razvitija elektroenergetiki v usloviyah tsifrovoj ekonomiki [Smart Grid of Russia as a new stage of power engineering development under conditions of digital economy] / F.V. Veselov, V.V. Dorofeev // *Energy Policy*. — 2018. — 5. — P. 43–53. [in Russian]
5. Dorofeev V.V. Aktivno-adaptivnaja set' – novoe kachestvo EES Rossii [Active-adaptive network – a new quality of the Unified Energy System of Russia] / V.V. Dorofeev, A.A. Makarov // *Energy Expert*. — 2018. — 5. — p. 8–10. [in Russian]
6. Voloshkin M.M. Upravlenie koeffitsientom silovyh transformatorov [Control of the coefficient of power transformer] / M.M. Voloshkin // *Notes of the Mining Institute*. — 2017. — Vol. 152. — P. 158–160. [in Russian]
7. Nurbosynov D.N. Algoritmy i matematicheskie modeli avtomaticheskogo izmeneniya ustavok RPN v rezhime ONLINE [Algorithms and mathematical models for automatic change of OLTC settings in ONLINE ] / D.N. Nurbosynov, T.V. Tabachnikova, A.V. Sharygin // *Information Technology*. — 2016. — 6. — P. 129–133. [in Russian]
8. Zhmak E.I. Regulirovanie naprjazhenija v elektroenergeticheskikh sistemah na osnove nechetkoj logiki [Voltage regulation in electric power systems based on fuzzy logic] : dis...of PhD in Engineering : 05.14.02 : defense of the thesis 2004-11-09 : approved 2004-11-09 / E.I. Zhmak. — Novosibirsk: 2004.— 120 p. [in Russian]
9. Nepsha F.S. Otsenka effektivnosti optimizatsii polozhenij ustrojstv vstrechnogo regulirovanija naprjazhenija na primere elektricheskikh setej filiala OAO «MRSK Sibiri» – «Kuzbassenergo – RES» [Evaluation of the efficiency of optimization of the positions of counter voltage regulation devices on the example of electric networks of the branch of JSC MRSK Siberia – Kuzbassenergo – RES] / F.S. Nepsha, A.A. Shevchenko, V.V. Dabarov // *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. — 2013. — 2(96). — P. 112–115. [in Russian]
10. Bezborodov D.S. Uluchshenie kachestva elektroenergii putem regulirovanija naprjazhenija v elektricheskikh setjah [Improving the quality of electric power by regulating voltage in electric networks] / D.S. Bezborodov, E.V. Kretov // *Bulletin of the Magistracy*. — 2020. — 5-5(104). — P. 68–69. [in Russian]