Научная статья
УДК 621.314
DOI: 10.14529/power260303

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНОГО ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

***Б.Д. Табаров**, behruz.tabarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5878-3755*
Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

Аннотация. В работе рассматривается возможность применения нового многоступенчатого реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства на высокой стороне трансформаторной подстанции взамен известных механических и гибридных регуляторов напряжения для улучшения эффективности функционирования силового трансформатора и потребителей электроэнергии в стационарных и динамических режимах работы подстанции за счет обеспечения компенсации отклонения и колебания напряжения в широких пределах и диапазонах, а также облегчения работы коммутационных аппаратов при включении и выключении трансформаторной подстанции с высокими энергетическими показателями. Для проведения исследования эксплуатационных характеристик заявляемого технического решения, оценки улучшения эффективности функционирования силового трансформатора и потребителей электроэнергии в стационарных и динамических режимах работы подстанции в среде MATLAB разработана имитационная модель трансформаторной подстанции с предложенным пускорегулирующим устройством. На имитационной модели трансформаторной подстанции проводилось исследование непрерывного регулирования напряжения при отклонении и колебании напряжения в питающей сети в пределах ±16 % от номинального значения с известным и новым регуляторами напряжения. Полученные результаты исследования подтверждают, что применение предлагаемого многоступенчатого реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства на стороне высокого напряжения трансформаторных подстанций позволяет улучшить функционирование силового трансформатора и потребителей электроэнергии в стационарных и динамических режимах работы подстанции. В статье также приводятся математические уравнения, которые описывают принцип действия заявляемого технического решения. Областью применения заявляемого технического решения являются трансформаторные подстанции системы электроснабжения, где требуется обеспечение многоступенчатого узкоподдиапазонного регулирования напряжения в широких пределах и диапазонах с высокой эффективностью.

Ключевые слова: питающая сеть, силовой трансформатор, потребители электроэнергии, многоступенчатое реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство, имитационная модель, отклонение и колебание напряжения, стабилизация напряжения

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2024–2026 годы по теме «Автоматизация авиастроительных производств с применением средств промышленной робототехники».

Для цитирования: Табаров Б.Д. Принципы построения трансформаторной подстанции на основе многоступенчатого реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2026. Т. 26, № 3. С. 25–36. DOI: 10.14529/power260303

Original article
DOI: 10.14529/power260303

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF A TRANSFORMER SUBSTATION BASED ON A MULTI-STAGE REACTOR-THYRISTOR START-UP DEVICE

***B.D. Tabarov**, behruz.tabarov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5878-3755*
Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The paper considers the possibility of using a new multi-stage reactor-thyristor start-up device on the high side of a transformer substation instead of the well-known mechanical and hybrid voltage regulators to improve the efficiency of the power transformer and electric power consumers in stationary and dynamic operating modes of the substation by providing compensation for voltage deviations and fluctuations over wide ranges, as well as facilitating the operation of switching devices when switching on and off a transformer substation with high energy performance. To study the operational characteristics of the proposed technical solution, to evaluate the improvement in the efficiency of the power transformer and electricity consumers in stationary and dynamic operating modes of the substation in the MATLAB environment, a simulation model of a transformer substation with the proposed start-up device has been

© Табаров Б.Д., 2026

developed. A simulation model of a transformer substation was used to study continuous voltage regulation with voltage deviation and fluctuation in the supply network within ± 16 % of the nominal value with known and new voltage regulators. The obtained research results confirm that the use of the proposed multi-stage reactor-thyristor start-up device on the high-voltage side of transformer substations makes it possible to improve the functioning of the power transformer and electricity consumers in stationary and dynamic operating modes of the substation. The article also provides mathematical equations that describe the principle of operation of the proposed technical solution. The field of application of the claimed technical solution is transformer substations of the power supply system, where it is required to provide multi-stage narrow-band voltage regulation over wide ranges and ranges with high efficiency.

Keywords: power supply network, power transformer, electric power consumers, multi-stage reactor-thyristor start-up device, simulation model, voltage deviation and fluctuation, voltage stabilization

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for 2024–2026 on the topic "Automation of aircraft manufacturing using industrial robotics".

For citation: Tabarov B.D. Principles of construction of a transformer substation based on a multi-stage reactor-thyristor start-up device. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2026;26(3):25–36. (In Russ.) DOI: 10.14529/power260303

Введение

Анализ исследования опыта работы существующих систем электроснабжения и научных работ отечественных и зарубежных ученных по обеспечению нормального функционирования, повышению эффективности работы и сохранению срока службы электрооборудования показал, что существующие системы электроснабжения (СЭС) нуждаются в модернизации штатных регуляторов напряжения или применении нового регулятора напряжения на основе компонентов силовой электроники и блоков реакторов для повышения точности стабилизации напряжения с сохранением синусоидальности токов и напряжений СЭС при широких пределах отклонения и колебания напряжения в питающей сети. По результатам анализа исследования известных научных работ и опыта эксплуатации существующих СЭС также выяснилось, что ухудшение качества электроэнергии приводит к нарушению функционирования технологических процессов, снижению энергетических показателей и сокращению срока службы электрооборудования СЭС [1–5]. Ослабление этих проблем рассматривалось в ряде научных работах, среди которых можно выделить работы отечественных [6–11] и зарубежных [12–20] ученых. В научных работах [6–20] ученые предлагают разные технические решения на основе механических [6, 8, 12, 14], электронных [7, 10, 13, 17] и комбинированных [9, 11, 15, 18–20] традиционных устройств. Как выяснилось из анализа исследования отечественных [6, 8] и зарубежных [12, 14] научных работ о традиционных механических устройствах, эти известные механические регуляторы напряжения [6, 8, 12, 14] обладают низкой точностью регулирования напряжения и низким быстродействием. В качестве недостатков существующих механических регуляторов напряжения также можно отметить узкий предел и диапазоны регулирования напряжения. Для ослабления вышеперечисленных проблем предлагается ряд других технических решений, которые построены на основе компонентов силовой электроники [7, 10, 13, 17]. Положительные стороны гибридных устройств заключаются в высокой точности их работы и высоком быстродействии по сравнению с механическими устройствами, а также обеспечении регулирования напряжения в широких пределах и диапазонах. В качестве их недостатков можно отметить наличие гармонических составляющих токов и напряжений при регулировании напряжения, особенно при возникновении отклонения и колебания напряжения в питающей сети в широких пределах и диапазонах. Как показывает практика, для устранения этих проблем на производстве применяют фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ), которое позволяет компенсировать несинусоидальности токов и напряжений. Однако применение ФКУ создает и ряд других проблем, например, приводит к загружению элементов СЭС реактивной мощностью. К недостаткам гибридных устройств можно также отнести низкие технико-экономические показатели, особенно в режиме минимального и номинального напряжения питающей сети. Существует также ряд комбинированных устройств для регулирования напряжения на высокой стороне силового трансформатора подстанции [9, 11, 15, 18–20]. Анализ исследования этих устройств [9, 11, 15, 18–20] подтверждает, что эти известные устройства позволяют регулировать напряжения в пределах ±15 % от номинального уровня с высоким быстродействием. К недостаткам этих устройств можно отнести низкие энергетические показатели из-за наличия больших гармонических составляющих токов и напряжений особенно при возникновении необходимости регулирования напряжения в широких пределах и диапазонах. Кроме этого, к недостаткам комбинированных устройств [9, 11, 15, 18–20] можно также отнести наличие отклонений и колебаний напряжения у потребителей, которые не выходят за пределы допустимых норм, установленных ГОСТами.

В рамках данной научно-исследовательской работы предлагается новое техническое решение [21], разработанное на основе модулей тиристор-

ных ключей и реакторов для поддержания номинального напряжения на входе и выходе силового трансформатора подстанции на заданном уровне, а также разгрузки элементов СЭС от потребления дополнительных энергий при нестабильности напряжения в питающей сети с высокой эффективностью. Заявляемое техническое решение предлагается взамен известных механических и гибридных регуляторов напряжения.

Цель и задачи исследований

Целью работы является улучшение функционирования и повышение эффективности работы СТ и потребителей электроэнергии, а также сохранение срока службы электрооборудования при возникновении отклонения и колебания напряжения в питающей сети в пределах ±16 % от номинального значения.

Для достижения указанной цели в работе ставились и решались следующие задачи:

– разработать многоступенчатый реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство (МР-ТПРУ) на основе модулей тиристорных ключей и реакторов для компенсации отклонения и колебания напряжения питающей сети с высокой точностью;

– разработать алгоритмы последовательности работы и способы управления МР-ТПРУ на высокой стороне ТП при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах;

– разработать имитационную модель трансформаторной подстанции (ТП) с МР-ТПРУ для проведения исследования стабилизации напряжения в подстанции при отклонении и колебании напряжения в широких пределах и диапазонах;

– исследовать непрерывное регулирование напряжения на входе СТ подстанции при компенсации отклонения и колебания напряжения в питающей сети в широких пределах и диапазонах;

– определить потери напряжения в подстанции с МР-ТПРУ при разных уровнях напряжения питающей сети.

Разработка принципиальной схемы электротехнических систем с новым техническим решением

Заявляемое техническое решение через сетевой высоковольтный выключатель Q_c последовательно подключается между питающей сетью (G) и первичной обмоткой силового трансформатора подстанции. Новое техническое решение разработано на основе модулей тиристорных ключей, реакторов и силового контактора, которые подключены между собой последовательно-параллельно по электротехническим принципам [21]. Функциональная схема электротехнической системы с новым техническим решением в однолинейном исполнении приведена на рис. 1 и содержит питающую сеть (G), линии электропередачи (W), сетевой высоковольтный выключатель (Q_c), блок многоступенчатого реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства (МР-ТПРУ), силовой трансформатор (СТ), блоки датчика отклонения напряжения (ДОН) и авторегулирования (БАР), автоматического выключателя (QF) и блок активно-индуктивной нагрузки (Z). Блок заявляемого технического решения (МР-ТПРУ) представляет собой основной ($L2$), дополнительный ($L3$), основно-промежуточный ($L1$) и дополнительно-промежуточный ($L4$) реакторы, модули основных (ТК1), дополнительных (ТК2), основно-промежуточных (ТК3) и дополнительно-промежуточных (ТК4) тиристорных ключей, а также блоки системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и синхронизации (БС) [21]. Блок активно-индуктивной нагрузки ($Z_н$) состоит из шины распределительного устройства напряжением 0,4 кВ, гибрид-

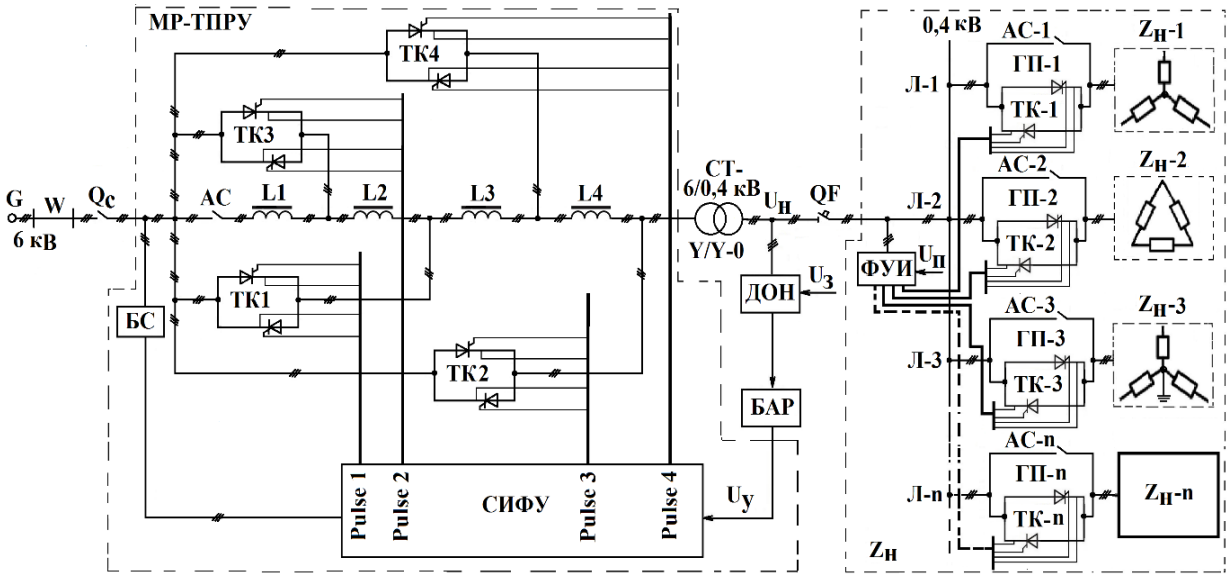

Рис. 1. Функциональная схема электротехнической системы с новым техническим решением
Fig. 1. Functional diagram of an electrical system with a new technical solution

ных пускателей (ГП-1–ГП-*n*) нагрузки ($Z_н$-1–$Z_н$-*n*) и блока формирователя импульсов управления (ФУИ) [22].

Разработка имитационной модели электротехнической системы с предлагаемым МР-ТППРУ

Имитационная модель ТП с МР-ТППРУ представлена на рис. 1. Она состоит из блока питающей сети (ПС), линии электропередачи (ЛЭП), блока сетевого высоковольтного выключателя (Q_c), модулей основных (ТК1), дополнительных (ТК2), основно-промежуточных (ТК3) и дополнительно-промежуточных (ТК4) тиристорных ключей, блока системы импульсно-фазового управления (СИФУ), основного (*L*2), дополнительного (*L*3), основно-промежуточного (*L*1) и дополнительно-промежуточного (*L*4) реакторов, силового трансформатора (СТ), активно-индуктивных нагрузок ($Z_н$-1–$Z_н$-8), блоков датчика отклонения напряжения (ДОН), авторегулирования (БАР), выключателя нагрузки ($Q_н$), гибридных пускателей (ГП-1–ГП-8) активно-индуктивных нагрузок, формирователя управляющих импульсов (ФУИ) гибридных пускателей блоков ГП-1–ГП-8, измерительных датчиков тока (ДТ) и напряжения (ДН), блоков измерительных приборов (ИП-1 и ИП-2) и других вспомогательных элементов.

Для автоматизации процесса компенсации отклонения и колебания напряжения в подстанции на модели ТП с МР-ТППРУ (рис. 2) заложена обратная связь по напряжению при помощи блоков ДОН и БАР. Функционирование предлагаемого технического решения в составе ТП зависит от изменения напряжения питающей сети и(или) тока нагрузки, которые определяются в блоке ДОН, и через блок БАР подаются сигналы на управляющие входы блока СИФУ для формирования импульсов и подача их через соответствующие выходящие каналы (Pulse-1–Pulse-5) на управляющие входы модулей тиристорных ключей и(или) силового контактора АС для изменения проводящих состояний того или иного модуля тиристорных ключей и(или) силового контактора АС, в результате чего напряжение на входе и выходе СТ по-прежнему остается номинальным.

Результаты исследования трансформаторной подстанции с МР-ТППРУ при непрерывном регулировании напряжения на входе подстанции

Результаты исследования непрерывного регулирования напряжения на высокой стороне ТП по штатным и новым устройствам при повышении или снижении напряжения в питающей сети в пределах ±16 % от номинального уровня приведены на осциллограммах рис. 3. Исследование проводилось на модели ТП мощностью 1000 кВ·А и напряжением 6/0,4 кВ при угле сдвига фаз активно-индуктивных нагрузок φ = 45 град. На этих осциллограммах показаны мгновенные (i_1, i_2, u_1, u_2) и действующие (I_1, I_2, U_1, U_2) значения фазных токов и напряжений питающей сети, силового трансформатора и нагрузки фазы «А». Здесь индексами 1 и 2 соответствующих токов и напряжений элементов системы электроснабжения разделены полученные результаты исследования при помощи известного (индекс 1) и нового (индекс 2) регуляторов напряжения, а индексы «п» или «с» параметров обозначают повышение (до +16 %) или снижение (до –16 %) напряжения в питающеей сети. Функционирование штатного и нового регу-

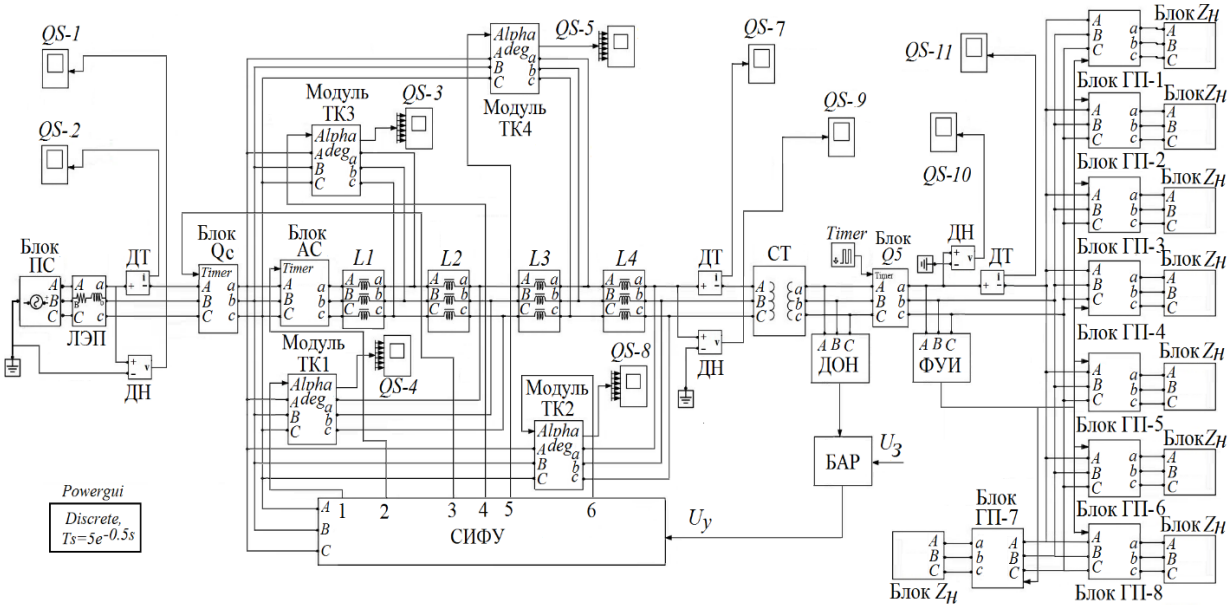

Рис. 2. Имитационная модель электротехнической системы с многоступенчатым реакторно-тиристорным регулятором напряжения
Fig. 2. Simulation model of an electrical system with a multi-stage reactor-thyristor voltage regulator

Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2026, vol. 26, no. 3, pp. 25–36
ISSN 1990-8512 (Print) ISSN 2409-1057 (Online)

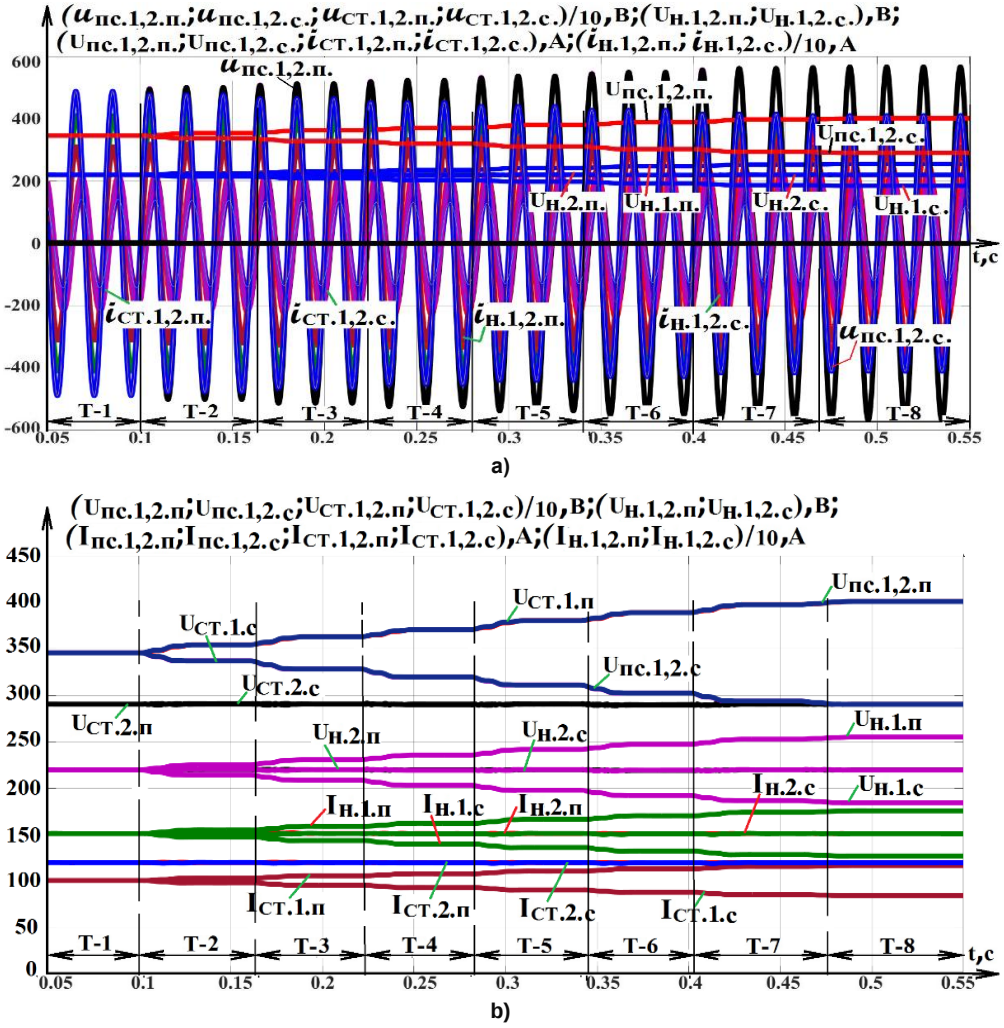

Рис. 3. Осциллограммы мгновенных и действующих значений токов и напряжений при дискретном отклонении напряжения в питающей сети и номинальной нагрузке
Fig. 3. Oscillograms of instantaneous and effective values of currents and voltages with discrete voltage deviation in the supply network and rated load

ляторов напряжения при номинальном напряжении питающей сети и токе нагрузки (Т1), а также ступенчатом повышении или снижении напряжения в питающей сети (Т-2–Т-8) иллюстрируются интервалами времени Т-1–Т-8 (см. рис. 3). Ниже рассмотрены происхождение отрицательного и положительного отклонений напряжения в питающей сети на каждом ступени по шагам ±2,5 % от номинального значения. Стоит подчеркнуть, что это не единственный вариант поддержания напряжения в подстанции на заданном уровне при помощи заявляемого регулятора напряжения. МР-ТПРУ обладает высокими стабилизационными свойствами, которые, стабилизируя напряжения в подстанции на заданном (номинальном) уровне, улучшают эффективность работы электроустановки при любых изменениях напряжения в питающей сети и(или) тока на нагрузке с высокими энергетическими показателями.

Ниже приведены математические описания, которые демонстрируют принцип действия МР-ТПРУ при пяти уровнях напряжения в питающей сети и изменении напряжения в питающей сети в десяти диапазонах между этими уровнями напряжения [21, 23].

Работу системы электроснабжения с известным и новым регуляторами напряжения при номинальном напряжении питающей сети и номинальной нагрузке иллюстрируют осциллограммы на рис. 3 с интервалом времени Т-1 (номинальный уровень регулирования напряжения). На этом уровне напряжения питающей сети и тока нагрузки напряжение на входе СТ прикладывается через модуль основных тиристорных ключей ТК1, дополнительный *L*3 и дополнительно-промежуточный *L*4 реакторы при выключенных модулях основно-промежуточных ТК3, дополнительных ТК4 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей, а также выключенных силовом контакторе АС, основном *L*2 и основно-промежуточном *L*4 реакторах [21, 23]. Модуль основных тиристорных ключей ТК1 на этом интервале времени

полностью включен при α = 15 град. Потери напряжения в СЭС на этом уровне регулирования напряжения можно описать формулой

$$\Delta U_{\text{ном}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{L3} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%, \quad (1)$$

где $\Delta U_{\text{ЛЭП}}$ – потери напряжения в линии электропередачи, %;
$\Delta U_{\text{СТ}}$ – потери напряжения в трансформаторе, %;
ΔU_{L3} – потери напряжения в дополнительном реакторе, %;
ΔU_{L4} – потери напряжения в дополнительно-промежуточном реакторе, %.

Потери напряжения в линии электропередачи, реакторах и трансформаторе можно определить по соответствующим формулам:

$$\Delta U_{\text{ЛЭП}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot I \cdot L}{U_{\text{н}}} (r_0 \cos\varphi + x_0 \sin\varphi), \%; \quad (2)$$

$$\Delta U_{L3,L4} = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot X_{\text{р}} \cdot \sin\varphi \cdot 100}{U_{\text{н}}}, \%; \quad (3)$$

$$\Delta U_{\text{СТ}} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_{\text{н}}} \cdot 100, \%, \quad (4)$$

где cosφ и sinφ – коэффициент активной и реактивной мощности линии электропередачи;
$I_{\text{н}}$ – ток в линии, А;
r_0 и x_0 – удельное активное и реактивное сопротивление линии электропередачи, Ом/км;
L – длина линии электропередачи, км;
P и Q – активная и реактивная мощности трансформатора, кВт и кВар;
$U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение трансформатора, кВ;
R и X – активное и реактивное сопротивление трансформатора, Ом;
$X_{\text{р}}$ – реактивное сопротивление реактора, Ом;
sinφ – коэффициент реактивной мощности реактора.

По формулам (5) и (6) можно определить активное и реактивное сопротивление трансформатора:

$$R = \left(\frac{U_{\text{н}}}{S_{\text{н}}}\right)^2 \cdot \Delta P_{\text{К.З.}}, \text{ Ом}; \quad (5)$$

$$X = \frac{{U_{\text{н}}}^2}{S_{\text{н}}} \cdot \frac{U_{\text{К.З.}}}{100}, \text{ Ом}, \quad (6)$$

где $\Delta P_{\text{КЗ}}$ – активная мощность КЗ трансформатора, кВт;
$U_{\text{КЗ}}$ – напряжение КЗ трансформатора, %;
$S_{\text{н}}$ – полная номинальная мощность трансформатора, кВА.

Сохранение напряжения в СЭС на номинальном уровне при отклонении напряжения в питающей сети на ±2,5 % и номинальной нагрузке иллюстрирует рис. 3 интервалам времени Т-2. Поддержание напряжения в СЭС на номинальном значении при повышении напряжения в питающей сети на +2,5 % от номинального значения достигается за счет создания падения напряжения в основном $L2$, дополнительном $L3$ и дополнительно-промежуточном $L4$ реакторах при помощи модулей основных ТК1 и основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей, а силовой контактор АС, основно-промежуточный реактор $L1$, модули дополнительных ТК2 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей при этом выключены (нижний диапазон: промежуточно-максимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. На этом интервале времени сопротивление основного реактора $L2$ шунтируется на $\frac{1}{5}X_{L2}$ модулем основных тиристорных ключей ТК1 при α = 80 град., а угол проводящего состояния модуля основно-промежуточных тиристорных ключей ТК3 при этом равен α = 125 град. Здесь потери напряжения в СЭС можно описать формулой (7). Сохранение напряжения в СЭС на заданном уровне при снижении напряжения в питающей сети на –2,5 % выполняется при помощи дополнительного $L3$ и дополнительно-промежуточного $L4$ реакторов, которые вводятся в работу модулями основных ТК1 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей, при выключенных силовом контакторе АС, основно-промежуточном $L1$ и основном $L2$ реакторах, модулях дополнительных ТК2 и основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей (нижний диапазон: промежуточно-минимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. Сопротивление дополнительного реактора $L3$ при снижении напряжения в питающей сети на –2,5 % шунтируется на $\frac{4}{5}X_{L3}$ модулем дополнительно-промежуточных тиристорных ключей ТК4 при α = 93 град., а угол проводящего состояния модуля основных тиристорных ключей ТК1 при этом составляет α = 57 град. Потери напряжения в СЭС на этом диапазоне регулирования напряжения можно определить по формуле (8).

$$\Delta U_{\text{н.пр-макс +2,5 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{1}{5}\Delta U_{L2} + \Delta U_{L3} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%; \quad (7)$$

$$\Delta U_{\text{н.пр-мин –2,5 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{4}{5}\Delta U_{L3} + \Delta U_{\text{L4}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%. \quad (8)$$

МР-ТПРУ в конце интервала времени Т-2 и начале интервала времени Т-3 (см. рис. 3) стабилизирует напряжения в СЭС на номинальном уровне при возникновении положительного или отрицательного отклонения напряжения в питающей сети на ±5 %. Обеспечение номинального напряжения в СЭС при повышении напряжения в питающей сети на +5 % от номинального значения достигается также за счет создания падения напряжения в основном $L2$, дополнительном $L3$ и дополнительно-промежуточном $L4$ реакторах при помощи модулей основных ТК1 и основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей, а силовой контактор АС, основно-промежуточный реактор $L1$, модули дополнительных ТК2 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей на этом диапазоне регулирования напряжения полностью выключены (нижний диапазон: промежуточно-максимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. Модуль основных тиристорных ключей ТК1 на этом интервале времени шунтирует сопротивление основного реактора $L1$ на $\frac{3}{5}X_{L2}$ при α = 97 град., а угол проводящего состояния модуля основно-промежуточных тиристорных ключей ТК3 при этом равен α = 105 град. Потери напряжения в СЭС на этом диапазоне регулирования напряжения можно определить по выражению (9). Предлагаемое МР-ТПРУ при снижении напряжения в питающей сети на –5 % поддерживает напряжения в СЭС на номинальном значении также при помощи дополнительного $L3$ и дополнительно-промежуточного $L4$ реакторов модулями основных ТК1 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей, при выключенных силовом контакторе АС, основно-промежуточном $L1$ и основном $L2$ реакторах, а также модулях дополнительных ТК2 и основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей (нижний диапазон промежуточно-минимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. На этом интервале времени модуль дополнительно-промежуточных тиристорных ключей ТК4 шунтирует сопротивление дополнительного реактора $L3$ на $\frac{2}{5}X_{L3}$ при α = 76 град., а угол проводящего состояния модуля основных тиристорных ключей ТК1 при этом равен α = 125 град. Потери напряжения в СЭС при снижении напряжения в питающей сети на –5 % можно определить по формуле (10).

$$\Delta U_{\text{н.пр-макс +5 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{3}{5}\Delta U_{L2} + \Delta U_{L3} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%; \quad (9)$$

$$\Delta U_{\text{н.пр-мин –5 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{2}{5}\Delta U_{L3} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%. \quad (10)$$

Поддержание напряжения в СЭС на заданном значении при отклонении напряжения в питающей сети на ±7,5 % и номинальной нагрузке иллюстрирует интервал времени Т-4. Предлагаемое МР-ТПРУ стабилизирует напряжение в СЭС на номинальном уровне при повышении напряжения в питающей сети на +7,5 % от номинального значения за счет создания падения напряжения в основном $L2$, дополнительном $L3$ и дополнительно-промежуточном $L4$ реакторах модулями основных ТК1 и основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей при выключенных силовом контакторе АС, основно-промежуточном реакторе $L1$, модулях дополнительных ТК2 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей (промежуточно-максимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. На этом уровне напряжения питающей сети сопротивление основного реактора $L2$ шунтируется на $\frac{4}{5}X_{L2}$ модулем основных тиристорных ключей ТК1 при α = 125 град., а модуль основно-промежуточных тиристорных ключей ТК3 при этом работает с углом управлением α = 57 град. Потери напряжения в СЭС, на этом уровне регулирования напряжения с учетом увеличения угла управления модуля основных тиристорных ключей ТК1 можно описать формулой (11). Обеспечение напряжения в СЭС на номинальном уровне при снижении напряжения в питающей сети на –7,5 % достигается при помощи модуля дополнительно-промежуточных тиристорных ключей ТК4 и дополнительно-промежуточного реактора $L4$ при полностью выключенных силовом контакторе АС, основно-промежуточном $L1$, основном $L2$ и дополнительном $L3$ реакторах, а также модулях основных ТК1, дополнительных ТК2 и основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей (промежуточно-минимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. На этом уровне напряжения питающей сети угол управления модуля дополнительно-промежуточных тиристорных ключей ТК4 составляет α = 15 град., а модуль основных тиристорных ключей ТК1 при этом полностью выключается при α = 150 град. По формуле (12) можно определить потери напряжения на этом уровне регулирования напряжения.

$$\Delta U_{\text{пр-макс +7,5 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{4}{5}\Delta U_{L2} + \Delta U_{L3} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%; \quad (11)$$

$$\Delta U_{\text{пр-мин –7,5 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%. \quad (12)$$

В конце интервала времени Т-4 и начале интервала времени Т-5 (см. рис. 3) внезапно напряжение в питающей сети отклоняется на ±10 % от номинального значения и создает необходимость поддержания напряжения в СЭС на номинальном значении. МР-ТПРУ при повышении напряжения в питающей сети на +10 % стабилизирует напряжения в СЭС на номинальном уровне за счет создания падения напряжения в основном $L2$, дополнительном $L3$, основно-промежуточном $L1$ и дополнительно-промежуточном $L4$

реакторах силовым контактором АС и модулем основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей при выключенных модулях основных ТК1, дополнительных ТК2 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей (верхний диапазон: промежуточно-максимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. Угол управления модуля основно-промежуточных тиристорных ключей ТК3 на этом диапазоне регулирования напряжения составляет α = 81 град. и шунтирует сопротивление основно-промежуточного реактора $L1$ на $\frac{1}{5}X_{L1}$, а модуль основных тиристорных ключей ТК1 при этом полностью выключены при α = 150 град. Здесь потери напряжения в СЭС можно описать формулой (13). Заявляемое МР-ТПРУ на интервале времени Т5 при снижении напряжения в питающей сети на –10 % сохраняет номинальное напряжения в СЭС за счет создания падения напряжения в дополнительно-промежуточном реакторе $L4$ модулями дополнительных ТК2 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей, при выключенных силовом контакторе АС, основно-промежуточном $L1$, основном $L2$ и дополнительном $L3$ реакторах, а также модулях основных ТК1 и основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей (верхний диапазон: промежуточно-минимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. Здесь модуль дополнительных тиристорных ключей ТК2 шунтирует сопротивление дополнительно-промежуточного реактора $L4$ на $\frac{4}{5}X_{L4}$ при α = 95 град., а угол проводящего состояния модуля дополнительно-промежуточных тиристорных ключей ТК4 при этом равен α = 67 град. Потери напряжения в СЭС при снижении напряжения в питающей сети на –10 % можно определить по выражению (14).

$$\Delta U_{\text{в.пр-макс +10 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{1}{5}\Delta U_{L1} + \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%; \quad (13)$$

$$\Delta U_{\text{в.пр-мин –10 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{4}{5}\Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%. \quad (14)$$

Предлагаемый регулятор напряжения на интервале времени Т-6 поддерживает номинальное напряжение в СЭС при отклонении напряжения в питающей сети на ±12,5 % от номинального значения. Поддержание напряжения в СЭС на номинальном уровне при повышении напряжения в питающей сети на +12,5 % достигается за счет создания падения напряжения в основно-промежуточном $L1$, основном $L2$, дополнительном $L3$ и дополнительно-промежуточном $L4$ реакторах силовым контактором АС и модулем основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей при полностью выключенных модулях основных ТК1, дополнительных ТК2 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей (верхний диапазон: промежуточно-максимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. Здесь, сопротивление основно-промежуточного реактора $L1$ шунтируется на $\frac{3}{5}X_{L1}$ модулем основно-промежуточных тиристорных ключей ТК3 при α = 98,5 град. Потери напряжения в СЭС на этом диапазоне регулирования напряжения можно описать формулой (15). МР-ТПРУ при снижении напряжения в питающей сети на –12,5 % обеспечивает номинальное напряжения в СЭС на заданном уровне при помощи дополнительно-промежуточного реактора $L4$, модулей дополнительных ТК2 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей при полностью выключенных силовом контакторе АС, основно-промежуточном $L1$, основном $L2$ и дополнительном $L3$ реакторах, а также модулях основных ТК1 и основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей (верхний диапазон: промежуточно-минимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. Модуль дополнительных тиристорных ключей ТК2 на этом уровне напряжения питающей сети при α = 78 град. шунтирует сопротивление дополнительно-промежуточного реактора $L4$ на $\frac{2}{5}X_{L4}$, а угол управления модуля дополнительно-промежуточных тиристорных ключей ТК4 при этом равен α = 115 град. Формулой (16) можно определить потери напряжения на этом диапазоне регулирования напряжения.

$$\Delta U_{\text{в.пр-макс +12,5 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{3}{5}\Delta U_{L1} + \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%; \quad (15)$$

$$\Delta U_{\text{в.пр-мин –12,5 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{2}{5}\Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%. \quad (16)$$

Обеспечение номинального напряжения в СЭС при отклонении напряжения в питающей сети на ±15 % от номинального значения иллюстрируется на интервале времени Т-7. На этом интервале времени МР-ТПРУ при повышении напряжения в питающей сети на +15 % стабилизирует напряжения в СЭС на заданном значении благодаря созданию падения напряжения в основно-промежуточном $L1$, основном $L2$, дополнительном $L3$ и дополнительно-промежуточном $L4$ реакторах при помощи силового контактора АС и модуля основно-промежуточных тиристорных ключей ТК3 при полностью выключенных модулях основных ТК1, дополнительных ТК2 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей (верхний диапазон: промежуточно-максимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. Здесь модуль основно-промежуточных тиристорных ключей ТК3 расшунтирует основно-промежуточный реактор $L1$ на $\frac{4{,}5}{5}X_{L1}$ при α = 117 град. Выражением (17) можно определить потери напряжения в СЭС при повышении напряжения в питающей сети на +15 %. Предлагаемое устройство при снижении напряжения в питающей сети на –15 % (интервал времени Т-7) поддерживает номинальное напряжение в СЭС на заданном значении

благодаря шунтированию сопротивления дополнительно-промежуточного реактора $L4$ модулем дополнительных тиристорных ключей ТК2 при полностью выключенных силовом контакторе АС, основно-промежуточном $L1$, основном $L2$ и дополнительном $L3$ реакторах, а также модулей основных ТК1 и основно-промежуточных ТК3 тиристорных ключей (верхний диапазон: промежуточно-минимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. Дополнительно-промежуточный реактор L4 на этом интервале времени шунтируется модулем дополнительных тиристорных ключей ТК2 при α = 62 град. на $\frac{1}{5}X_{L4}$, а модуль дополнительно-промежуточных тиристорных ключей ТК4 при этом находится в работе при угле управления α = 140 град. Потерь напряжения на этом диапазоне регулирования напряжения можно определить по формуле (18).

$$\Delta U_{\text{в.пр-макс.+15 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{4{,}5}{5}\Delta U_{L1} + \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%; \quad (17)$$

$$\Delta U_{\text{в.пр-мин.–15 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \frac{1}{5}\Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%. \quad (18)$$

В конце интервала времени Т-7 и начале интервала времени Т-8 (см. рис. 3) внезапно напряжение в питающей сети меняется до ±16 % от номинального значения [21, 23]. Обеспечение номинального напряжения в СЭС на заданном значении при повышении напряжения в питающей сети на +16 % достигается основно-промежуточным $L1$, основным $L2$, дополнительным $L3$ и дополнительно-промежуточным $L4$ реакторами при включенном силовом контакторе АС и полностью выключенных модулях основных ТК1, дополнительных ТК2, основно-промежуточных ТК3 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей (максимальный уровень регулирования напряжения) [21, 23]. Потери напряжения в СЭС при максимальном уровне регулирования напряжения можно определить выражением (19). Стабильно поддерживать напряжение в СЭС на номинальном уровне при его снижении в питающей сети на –16 % (интервал времени Т-8) возможно за счет работы трансформатора на полной мощности, которая достигается модулем дополнительных тиристорных ключей ТК2 при выключенных силовом контакторе АС, основно-промежуточном $L1$, основном $L2$, дополнительном $L3$ и дополнительно-промежуточном $L4$ реакторах, а также полностью выключенных модулях основных ТК1, основно-промежуточных ТК3 и дополнительно-промежуточных ТК4 тиристорных ключей (минимальный уровень регулирование напряжения) [21, 23]. Модуль дополнительных тиристорных ключей ТК2 при минимальном уровне регулирования напряжения полностью включены при α = 15 град. Здесь потери напряжения можно определить по выражению (20).

$$\Delta U_{\text{макс +16 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{L1} + \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3} + \Delta U_{L4} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%; \quad (19)$$

$$\Delta U_{\text{мин –16 \%}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \%. \quad (20)$$

Таким образом, предлагаемое МР-ТПРУ в зависимости от величины и знака отклонения и колебания напряжения в питающей сети и(или) тока на нагрузке обеспечивает непрерывное регулирование напряжения на высокой стороне трансформаторной подстанции с высокими энергетическими показателями.

Осциллограммы, приведенные на рис. 3, подтверждают, что благодаря стабилизационным свойствам МР-ТПРУ напряжение в СЭС поддерживается на номинальном уровне при возникновении отклонения и колебания напряжения в питающей сети в пределах ±16 % с высокой эффективностью. Предлагаемое МР-ТПРУ также позволяет стабилизировать напряжение у потребителей на заданном уровне при возникновении глубоких провалов напряжения и перенапряжения в подстанции с высокими энергетическими показателями (имеются предварительные результаты исследования) [21, 23, 24].

Областью применения предлагаемого МР-ТПРУ являются трансформаторные подстанции систем электроснабжения мощностью до 63 000 кВ·А напряжениями 35/(10–6) кВ и мощностью до 1600 кВ·А напряжениями (10–6)/0,4 кВ, требующие регулировать напряжения в узком диапазоне от номинального уровня до ±16 % с высокой эффективностью.

Заключение

1. Установлено, что существующие трансформаторные подстанции нуждаются в модернизации существующих механических и комбинированных регуляторов напряжения или применении нового регулятора напряжения для поддержания номинального напряжения на входе силового трансформатора и у потребителей электроэнергии на заданном уровне с целью обеспечения нормальной работы электрооборудования, снижения дополнительных потерь электроэнергии и улучшения качества выпускаемой продукции с высокими энергетическими показателями (см. рис. 3b, кривые $U_{1.\text{пов}}$ и $U_{1.\text{сниж}}$).

2. Разработано и предложено многоступенчатое реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство на высокой стороне силового трансформатора взамен известных пускорегулирующих устройств для устранения недостатков существующих трансформаторных подстанций с механическими и гибридными регуляторами напряжения с высокими энергетическими показателями.

3. Разработаны и предложены новые алгоритмы и способы управления трансформаторной подстанции с предлагаемым многоступенчатым реакторно-тиристорным пускорегулирующим устройством для обеспечения непрерывности и точности регулирования напряжения в системах электроснабжения с высокими энергетическими показателями.

4. Сравнительные анализы полученных результатов исследования стабилизации напряжения в подстанции с известным и новым техническими решениями при возникновении отклонения напряжения в питающей сети в пределах до ±16 % от номинального уровня подтверждают, что предлагаемый регулятор напряжения поддерживает номинальное напряжения на входе и выходе силового трансформатора подстанции на заданном уровне с высокими энергетическими показателями (см. рис. 3b, кривые $U_{2.пов}$ и $U_{2.сниж}$). Кроме этого, предлагаемое устройство при повышении напряжения в питающей сети разгружает питающую сеть, силовой трансформатор и потребителей электроэнергии от дополнительных загрузок.

Список литературы

1. Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А. Требования к качеству электроснабжения промышленных предприятий в связи с переводом электроэнергетики России на технологию Smart Grid // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 4. С. 43–52. DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_43

2. Автоматическая система компенсации искажений (перепадов) напряжения / Д.О. Задворнов, В.А. Каракозова, В.А. Тоскунов, И.О. Христич // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2021. № 2 (89). С. 34–44.

3. Севостьянов А.А. О влиянии качества электрической энергии на режимы функционирования промышленных систем электроснабжения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 94-го заседания Междунар. науч. семинара. Вып. 73. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2022. С. 399–408.

4. Волков Н.Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Томск: Томский политехнический университет, 2010. 152 с.

5. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using Particle Swarm Optimization / W. Al-Saedi, S.W. Lachowicz, D. Habibi, O. Bass // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2012. Vol. 42, iss. 1. P. 139–149. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.04.007

6. Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 214 с.

7. Климаш В.С. Регулировочные свойства и энергетические коэффициенты тиристорных выпрямителей и регуляторов переменного напряжения: учеб.-справ. пособие. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 1998. 88 с.

8. Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Абдрахманов Р.С. Обеспечение нормативного уровня напряжения в распределительных сетях 0,4–10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов // Проблемы энергетики. 2011. № 9–10. С. 40–45.

9. Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш. Моделирование системы электроснабжения с питанием группы потребителей от трансформатора с тиристорным регулятором напряжения и мощности // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013. № 5 (1). С. 224–230.

10. Кралин А.А., Крюков Е.В., Асабин А.А. Принципы работы тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения для распределительных сетей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 2 (125). С. 112–118. DOI: 10.46960/1816-210X_2019_2_112

11. Смирнов С.С., Осак А.Б. Управляемый подмагничиванием трансформатор как эффективное средство регулирования напряжения в сети // Вестник ИрГТУ. 2016. № 6 (113). С. 146–155. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-6-146-155.

12. Klavsuts D.A., Klavsuts I.L., Levinzon S.V. New Method for Regulating Voltage an AC Current // Proceeding of 46-th International Universities' Power Engineering Conference – UPEC 2011. Section "Power Conversion". Germany: South Westphalia University of applied Sciences, Soest, September, 5–8, 2011.

13. Fishov A.G., Klavsuts D.A., Klavsuts I.L. Multi-Agent Regulation of Voltage in Smart Grid System with the Use of Distributed Generation and Customers // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 698. P. 761–767. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.761

14. Patent 7816894 B2 (US). Method and Apparatus for Regulating Voltage / L.Z. Feigin, S.V. Levinson, D.A. Klavsuts. 2010.

15. Classification of power quality disturbances via deep learning / J. Ma, J. Zhang, L. Xiao et al. // IETE Technical Review. 2017. Vol. 34, no. 4. P. 408–415. DOI: 10.1080/02564602.2016.1196620

16. Panfilov D.I., ElGebaly A.E., Astashev M.G. Design and assessment of static VAR compensator on railways power grid operation under normal and contingencies conditions // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Florence, Italy, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555525

17. Xiao H., Zhu C., Liu F. Research of Power Quality Management Technology According to Distribution Network Involving Electric Arc Furnace // 2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Nanchang, China, 2012. P. 7–10. DOI: 10.1109/IHMSC.2012.8

18. Improving Power Quality by a Four-Wire Shunt Active Power Filter: A Case Study / M. Popescu, A. Bitoleanu, M. Linca, C.V. Suru // Energies. 2021. Vol. 14, no. 7. P. 1951. DOI: 10.3390/en14071951

19. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks / A. Vinogradov, A. Vinogradova, I. Golikov, V. Bolshev // Int. J. Emerg. Electr. Power Syst. 2019. Vol. 20, no. 3. P. 2018–0269. DOI: 10.1515/ijeeps2018-0269

20. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods / F.G. Montoya, R. Banos, C. Gil et al. // Eng. Appl. Artif. Intell. 2010. Vol. 23, no. 5. P. 695–703. DOI: 10.1016/j.engappai.2010.01.011

21. Пат. 2838255 Российская Федерация, МПК: H02M 5/25 (2006.01). Многоступенчатое реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство трансформаторной подстанции / Б.Д. Табаров; заявитель и патентообладатель Б.Д. Табаров. № 2024132055; заявл. 23.10.2024; опубл. 14.04.2025, Бюл. № 11. 12 с.

22. Климаш В.С., Табаров Б.Д. Трансформаторная подстанция с реакторно-тиристорным регулированием напряжения и реактивной мощности // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы V Междунар. науч.-практ. конф., г. Комсомольск-на-Амуре, 6–11 декабря 2021 года. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. ун-т, 2022. С. 136–139.

23. Пат. 2841517 Российская Федерация, МПК: H02M 5/257 (2006.01). Способ управления многоступенчатым реакторно-тиристорным пускорегулирующим устройством трансформаторной подстанции / Б.Д. Табаров; заявитель и патентообладатель Б.Д. Табаров. № 2024135480; заявл. 25.11.2024; опубл. 09.06.2025, Бюл. № 16. 22 с.

24. А. с. 2023685892 Российская Федерация. Программный комплекс имитационной моделей двухтрансформаторной подстанции с одним общим двухподдиапазонным реакторно-тиристорным управляемым регулятором напряжения / Б.Д. Табаров. 2023.

References

1. Vagin G.Y., Kulikov A.L., Sevostyanov A.A. Requirements for quality of power supply to industrial enterprises in connection with transfer of Russian electric power industry to smart grid technology. *Smart Electrical Engineering*. 2022;4:43–52. (In Russ.) DOI: 10.46960/2658-6754_2022_4_43

2. Zadvornov D.O., Karakozova V.A., Toskunov V.A., Hristich I.O. Automatic compensation of voltage dips in power supply. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2021;2(89):34–44. (In Russ.)

3. Sevostyanov A.A. [On the influence of the quality of electric energy on the modes of operation of industrial power supply systems]. In: *Methodological Issues in the Reliability Analysis of Large-Scale Energy Systems: Proceedings of the 94th Meeting of the International Scientific Seminar. Iss. 73*. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, 2022. P. 399–408. (In Russ.)

4. Volkov N.G. *Kachestvo elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya* [The quality of electricity in power supply systems]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2010. 152 p. (In Russ.)

5. Al-Saedi W., Lachowicz S.W., Habibi D., Bass O. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using Particle Swarm Optimization. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2012;42(1):139–149. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.04.007

6. Venikov V.A., Idelchik V.I., Liseev M.S. *Regulirovanie napryazheniya v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Voltage regulation in electric power systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 214 p. (In Russ.)

7. Klimash V.S. *Regulirovochnye svoystva i energeticheskie koeffitsienty tiristornykh vypryamiteley i regulyatorov peremennogo napryazheniya: ucheb.-sprav. posobie* [Regulating properties and energy coefficients of thyristor rectifiers and AC voltage regulators: educational and reference manual]. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 1998. 88 p. (In Russ.)

8. Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Abdrakhmanov R.S. [Ensuring the regulatory voltage level in distribution networks of 0.4–10 kV using voltage-add-on transformers]. *Problemy energetiki*. 2011;9–10:40–45. (In Russ.)

9. Sosnina E.N., Bedretdinov R.Sh. Simulation of a power-supply system with a thyristor controlled transformer. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2013;5(1):224–230 (In Russ.)

10. Kralin A.A., Kryukov E.V., Asabin A.A. [Principles of operation of a thyristor regulator of the magnitude and phase of a voltage supplement for distribution networks]. *Transactions of Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev*. 2019;2(125):112–118. (In Russ.) DOI: 10.46960/1816-210X_2019_2_112

11. Smirnov S.S., Osak A.B. Controlled magnetic biased transformer as an effective tool of supply voltage regulation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;6(113):146–155. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2016-6-146-155

12. Klavsuts D.A., Klavsuts I.L., Levinzon S.V. New Method for Regulating Voltage an AC Current. In: *Proceeding of 46-th International Universities' Power Engineering Conference – UPEC 2011. Section "Power Conversion"*. Germany: South Westphalia University of applied Sciences, Soest, September, 5–8, 2011.

13. Fishov A.G., Klavsuts D.A., Klavsuts I.L. Multi-Agent Regulation of Voltage in Smart Grid System with the Use of Distributed Generation and Customers. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;698:761–767. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.698.761

14. Feigin L.Z., Levinson S.V., Klavsuts D.A. Method and Apparatus for Regulating Voltage. Patent 7816894 B2 (US), 2010.

15. Ma J., Zhang J., Xiao L., Chen K., Wu J. Classification of power quality disturbances via deep learning. *IETE Technical Review*. 2017;34(4):408–415. DOI: 10.1080/02564602.2016.1196620

16. Panfilov D.I., ElGebaly A.E., Astashev M.G. Design and assessment of static VAR compensator on railways power grid operation under normal and contingencies conditions. In: *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. Florence, Italy, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555525

17. Xiao H., Zhu C., Liu F. Research of Power Quality Management Technology According to Distribution Network Involving Electric Arc Furnace. In: *2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*. Nanchang, China, 2012. P. 7–10. DOI: 10.1109/IHMSC.2012.8

18. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M., Suru C.V. Improving Power Quality by a Four-Wire Shunt Active Power Filter: A Case Study. *Energies*. 2021;14(7):1951. DOI: 10.3390/en14071951

19. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I., Bolshev V. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks. *Int. J. Emerg. Electr. Power Syst*. 2019;20(3):2018–0269. DOI: 10.1515/ijeeps2018-0269

20. Montoya F.G., Banos R., Gil C., Espin A., Alcayde A., Gomez J. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods. *Eng. Appl. Artif. Intell*. 2010;23(5):695–703. DOI: 10.1016/j.engappai.2010.01.011

21. Tabarov B.D. *Mnogostupenchatoe reaktorno-tiristornoe puskoreguliruyushchee ustroystvo transformatornoy podstantsii* [Multi-stage reactor-thyristor start-up device of a transformer substation]. Patent RF 2838255, IPC: N02M 5/25 (2006.01), no. 2024132055; decl. 10/23/2024; publ. 04/14/2025, Bul. no. 11. 12 p. (In Russ.)

22. Klimash V.S., Tabarov B.D. Transformer substation with reactor-thyristor voltage and reactive power regulation. In: *Production technologies of the future: from creation to implementation: materials of the V International Scientific and Practical Conference, Komsomolsk-on-Amur, December 6–11, 2021*. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University, 2022. P. 136–139. (In Russ.)

23. Tabarov B.D. *Sposob upravleniya mnogostupenchatym reaktorno-tiristornym puskoreguliruyushchim ustroystvom transformatornoy podstantsii* [Method of controlling a multi-stage reactor-thyristor start-up device of a transformer substation]. Patent RF 2841517, IPC: N02M 5/257 (2006.01), no. 2024135480; decl. 11/25/2024; publ. 06/29/2025, Bul. no. 16, 22 p. (In Russ.)

24. Tabarov B.D. *Programmnyy kompleks imitatsionnoy modeley dvukhtransformatornoy podstantsii s odnim obshchim dvukhpoddiapazonnym reaktorno-tiristornym upravlyaemym regulyatorom napryazheniya* [Software package for simulation models of a two-transformer substation with one common dual-band reactor-thyristor controlled voltage regulator]. Author's certificate 2023685892 (RF), 2023. (In Russ.)

Информация об авторе

Табаров Бехруз Довудходжаевич, канд. техн. наук, доц. кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия; behruz.tabarov@mail.ru.

Information about the author

Bekhruz D. Tabarov, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Electric Drives and the Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia; behruz.tabarov@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 09.12.2025; одобрена после рецензирования 06.05.2026; принята к публикации 06.05.2026.

The article was submitted 09.12.2025; approved after review 06.05.2026; accepted for publication 06.05.2026.