

ОЦЕНКА РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ В ШИРОКИХ ПРЕДЕЛАХ И ДИАПАЗОНАХ

Б. Д. Табаров

Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27

В работе рассматривается влияние реакторно-тиристорного регулятора напряжения на синусоидальность тока и напряжения систем электроснабжения при стабилизации напряжения путём ступенчатого повышения напряжения в питающей сети до +16 % и снижении тока на нагрузке до −70 % от номинального уровня для оценки расширения функциональных возможностей заявляемого технического решения. Исследование проводилось в среде Matlab на имитационной модели системы электроснабжения с применением измерительных модулей, которое позволило оценить расширение функциональных возможностей предлагаемого регулятора напряжения с высокими энергетическими показателями. Работа проводилась при повышении напряжения в питающей сети до +16 % по шагам +2,5 %, а при снижении тока на нагрузке до −70 % по шагам −10 % от номинального значения. Полученные результаты подтверждают, что заявляемое устройство не искажает синусоидальность токов и напряжения питающей сети при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах. Результатами численных экспериментов также установлено, что новое техническое решение создает максимальное искажение напряжения в силовом трансформаторе и у потребителей электроэнергии на 3,75 % при повышении напряжения в питающей сети на +10 %, а при снижении тока нагрузки на −40% от номинального уровня. Значение несинусоидальности напряжения составляет 1,63 %, которые не выходят за нормально допустимые нормы, установленные отечественным и зарубежным ГОСТами. Наиболее целесообразной областью применения заявляемого технического решения является система электроснабжения, где при возникновении положительного отклонения и колебания напряжения в питающей сети и (или) отрицательного отклонения и колебания тока на нагрузке в широких пределах и диапазонах возникает необходимость поддерживать номинальное напряжение у потребителей на заданном уровне с высокой эффективностью.

Ключевые слова: система электроснабжения, тиристорный ключ, реактор, коэффициент несинусоидальности напряжения, коэффициент искажения синусоидальности тока, угол управления, широкий диапазон регулирования напряжения.

Для цитирования: Табаров Б. Д. Оценка расширения функциональных возможностей реакторно-тиристорного регулятора напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах // Омский научный вестник. 2025. № 4 (196). С. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-73-81. EDN: OPMGVK.



© Табаров Б. Д., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

EVALUATION OF THE EXPANSION OF THE FUNCTIONALITY OF A REACTOR-THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR WITH WIDE VOLTAGE REGULATION RANGES

B. D. Tabarov

Komsomolsk-on-Amur State University, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Lenina Ave., 27, 681013

The paper considers the effect of a reactor-thyristor voltage regulator during voltage stabilization on the sinusoidal current and voltage of electrical complexes and systems with a stepwise increase in supply voltage to +16 % and a decrease in load current to −70 % of the nominal level. This study is conducted in the Matlab environment on a simulation model of electrical complexes and systems using measuring modules

to evaluate the expansion of the functionality of the proposed voltage regulator when voltage is stabilized in electrical complexes and systems with high energy performance. The study is conducted when the supply voltage is increased to +16 % in steps of +2.5 %, and when the load current is reduced to -70 % in steps of -10 % of the nominal value. The obtained research results confirm that the claimed device does not distort the sinusoidal voltage of the supply network and currents of electrical complexes and systems when regulating voltage in wide aisles and sub-ranges. The results of numerical experiments also showed that the new technical solution creates a maximum voltage distortion in the power transformer and in electricity consumers by 3.75 % when the voltage in the supply network increases by +10 % and by 1.63 % when the load current decreases by -40% of the nominal level, which does not exceed the normally permissible standards established by domestic and foreign GOST standards. The most appropriate area of application of the claimed technical solution is electrical engineering complexes and systems where it becomes necessary to maintain the voltage at a given level in the event of a positive deviation and voltage fluctuations in the supply network and negative deviations, and current fluctuations on the load in wide ranges with high efficiency.

Keywords: electrical engineering complexes and systems, thyristor switch, reactor, non-sinusoidal voltage coefficient, current sinusoidal distortion coefficient, angle control, wide range voltage regulation.

For citation: Tabarov B. D. Evaluation of the expansion of the functionality of a reactor-thyristor voltage regulator with wide voltage regulation ranges. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 4 (196). P. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-196-73-81. EDN: OPMGVK.



© Tabarov B. D., 2025.

The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Расширение функциональных возможностей и улучшение эффективности функционирования гибридных регуляторов напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах является актуальной задачей при стабилизации напряжения в системах электроснабжения на требуемом уровне [1–3]. Как известно из опыта эксплуатации систем электроснабжения (СЭС), описанных в ряде научных работ отечественных [1–4] и зарубежных [5–7] ученых, в последние годы традиционные механические регуляторы напряжения не удовлетворяют требованиям потребителей электроэнергии по сохранению номинального напряжения на заданном уровне в случае возникновения отклонений и колебаний тока и напряжения в питающей сети. Применение дополнительных устройств в целом позволило бы достигнуть высокого значения технико-экономических показателей электроустановок.

Учитывая необходимость поддержания напряжения в СЭС на заданном уровне, в частности у потребителей электроэнергии, и улучшения технико-экономических показателей традиционных механических регуляторов напряжения, отечественные и зарубежные ученые разработали гибридные регуляторы напряжения на основе компонентов силовой электроники для устранения недостатков известных технических решений [7–16]. Стоит подчеркнуть, что некоторые из этих гибридных регуляторов напряжения нашли области применения в реальной установке [8, 10, 13, 16]. В качестве положительных сторон гибридных регуляторов напряжения можно отметить расширение функциональных возможностей, улучшение точности функционирования и их быстродействия при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах [7–16].

Известные гибридные регуляторы напряжения, построенные на основе элементов силовой электроники, обладают также и недостатками, связанными с ухудшением качества электроэнергии и технико-экономических показателей электроустановки

за счет возникновения значительных гармонических составляющих токов и напряжений при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах [7–16], которые выходят за предельно допустимые нормы, установленные отечественными и зарубежными ГОСТами [17, 18]. Для компенсации гармонических составляющих токов и напряжений ученые предлагают рассматривать применение фильтрокомпенсирующего устройства, в результате чего не только усложняется работа и ухудшаются технико-экономические показатели СЭС, но и снижается надежность работы электрооборудования.

Автором статьи на основе проведения исследований и получения аналитических обзоров информационных источников, а также опыта эксплуатации существующих гибридных регуляторов напряжения разработано новое техническое решение [19], алгоритмы и способы его управления [20] для устранения недостатков традиционных механических и гибридных регуляторов напряжения с высокой эффективностью.

Целью работы является оценка расширения функциональных возможностей и эффективности функционирования предлагаемого технического решения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах.

Для достижения поставленной цели в рамках данного исследования ставились и решались следующие задачи:

1) на основе функциональной схемы, представленной в работе [19], разработать блочно-модульную модель СЭС с применением измерительных модулей [21] для проведения исследования и оценки расширения функциональных возможностей, а также для эффективности функционирования предлагаемого регулятора напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах;

2) исследовать и оценить влияние предлагаемого технического решения на синусоидальность напряжений СЭС при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах;

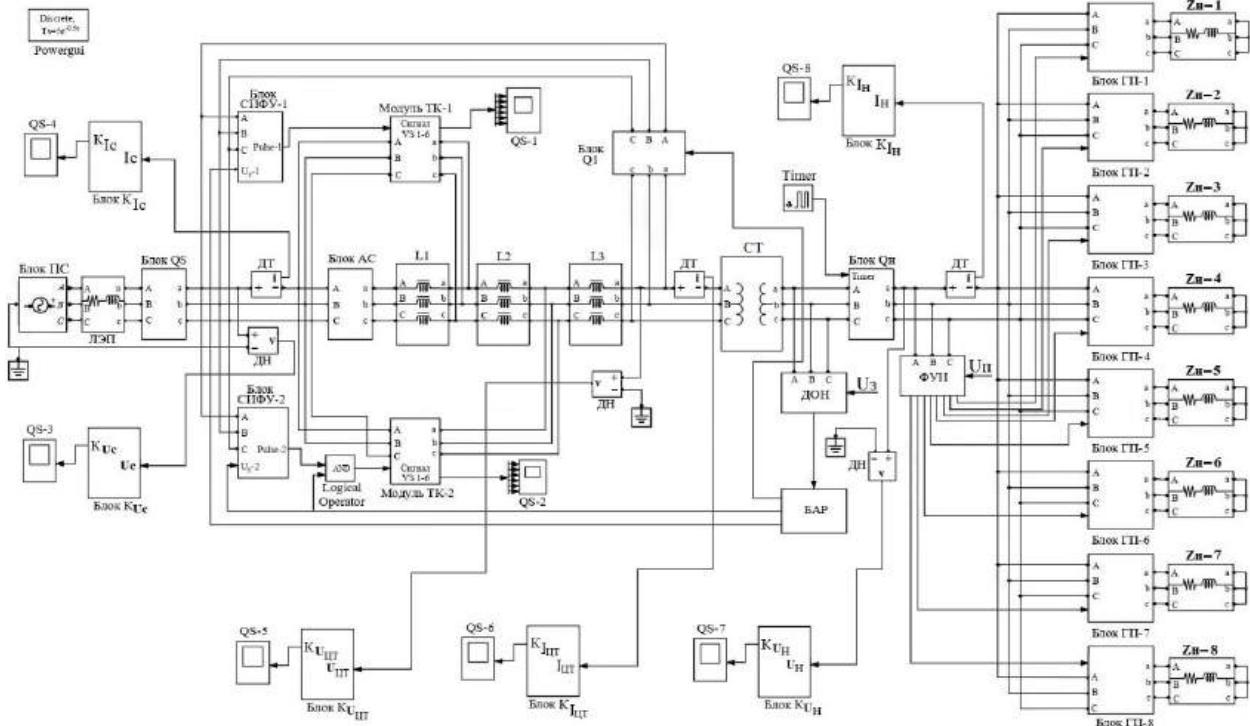


Рис. 1. Имитационная модель системы электроснабжения с новым реакторно-тиристорным регулятором напряжения и измерительными модулями: ПС — блок питающей сети; ЛЭП — линии электропередачи; QS — блок разъединителя; АС — блок контактора; L1, L2, L3 — основной, промежуточный, дополнительный реакторы; ТК-1, ТК-2 — модули основных и дополнительных тиристорных ключей; СИФУ-1, СИФУ-2 — блоки системы импульсно-фазового управления; Q1 — блок сетевого выключателя; СТ — силовой трансформатор; ДОН, БАР — блоки датчиков отклонения напряжения и авторегулирования; QF — блок автоматического выключателя; ФУИ — блок формирователя управляемых импульсов гибридных пускателей; ГП-1, ГП-2, ГП-3 — блоки гибридных пускателей нагрузок; Zn-1, Zn-2, Zn-3 — блоки активно-индуктивных нагрузок; КИС, KIP, KIn — блоки вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения питающей сети, силового трансформатора и нагрузки; KПС, KICP, KIn — блоки вычисления коэффициента искажения синусоидальности тока питающей сети, силового трансформатора и нагрузки

Fig. 1. Simulation model of the power supply system with a new reactor-thyristor voltage regulator and measuring modules: ПС — supply network unit; ЛЭП — power transmission lines; QS — disconnector unit; АС — contactor unit; L1, L2, L3 — main, intermediate, additional reactors; ТК-1, ТК-2 — modules of the main and additional thyristor switches; СИФУ-1, СИФУ-2 — pulse-phase control system units; Q1 — mains switch unit; СТ — power transformer; ДОН, БАР — voltage deviation and auto-regulation sensor units; QF — circuit breaker unit; ФУИ — block for generating control pulses of hybrid starters; ГП-1, ГП-2, ГП-3 — blocks of hybrid load starters; Zn-1, Zn-2, Zn-3 — blocks of active-inductive loads; KИС, KIP, KIn — blocks for calculating the coefficient of non-sinusoidal voltage of the supply network, power transformer and load; KПС, KICP, KIn — blocks for calculating the coefficient of distortion of the sinusoidal current of the supply network, power transformer and load

3) исследовать и оценить влияние заявляемого устройства на синусоидальность токов СЭС при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах;

4) получить осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений на разных участках СЭС, иллюстрирующие возникновение несинусоидальности токов и напряжений при стабилизации напряжения в СЭС.

Разработка имитационной модели системы электроснабжения с измерительными блоками

Для проведения исследования и оценки расширения функциональных возможностей реакторно-тиристорного регулятора напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах в среде Matlab разработана блочно-модульная имитационная модель СЭС с измерительными блоками, позволяющая вычислить коэффициенты несинусоидальности напряжения и искажения синусоидальности тока при стабилизации напряжения. Модель представлена на рис. 1.

Для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжений и искажения синусоидальности токов СЭС измерительные блоки подключены к питающей сети ($K_{U_{\text{ПС}}}$, $K_{I_{\text{ПС}}}$), силовому трансформаторо-

му ($K_{U_{\text{СТ}}}$, $K_{I_{\text{СТ}}}$) и нагрузке ($K_{U_{\text{Н}}}$, $K_{I_{\text{Н}}}$). Измерительные блоки вычисления несинусоидальности напряжений (K_U) и искажения синусоидальности токов (K_I) СЭС, подключенные к имитационной модели исследуемого объекта, разработаны в среде Matlab [21] на основе ниже представленных формул.

Измерительный блок вычисления несинусоидальности напряжения (K_U) разработан в среде Matlab по формуле:

$$K_U = \frac{U_{\Sigma}}{U_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где U_{Σ} — действующее значение суммы всех высших гармоник напряжения; U_1 — действующее значение первой гармоники напряжения.

Действующее значение суммы всех высших гармоник напряжения зависит от действующих значений исследуемого напряжения и первой гармоники напряжения, которое определяется по следующему выражению:

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U^2 - U_1^2}, \quad (2)$$

где U — действующее значение исследуемого напряжения.

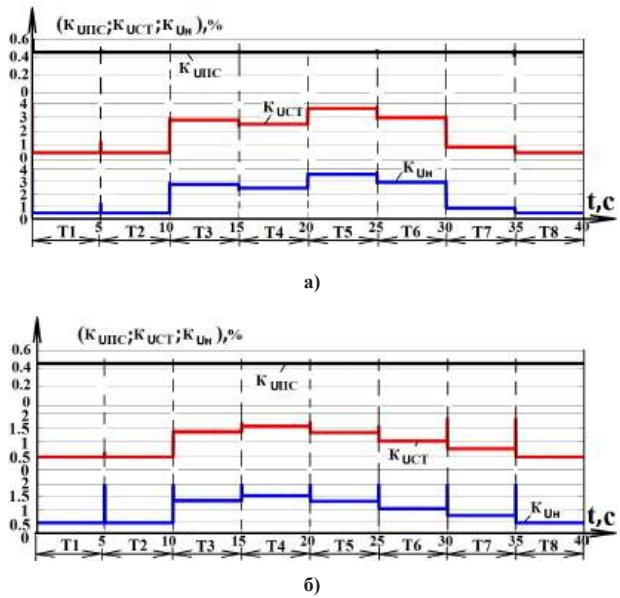


Рис. 2. Осциллограммы результатов исследования коэффициента несинусоидальности напряжения: а — при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 %; б — при снижении тока нагрузки до −70 % от номинального значения

Fig. 2. Oscilloscope results of a study of the non-sinusoidal voltage coefficient: a — with a stepwise increase in the supply voltage to +16%; б — with a decrease in the load current to −70% of the nominal value

Измерительный блок вычисления искажения синусоидальности тока (K_i) создан по формуле [21]:

$$K_i = \frac{I_{(1)}}{I}, \quad (3)$$

где $I_{(1)}$ — действующее значение первой гармоники тока; I — действующее значение исследуемого тока.

Результаты исследования влияния предлагаемого технического решения на синусоидальности токов и напряжений системы электроснабжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах

Исследование влияния предлагаемого технического решения на синусоидальности токов и напряжений СЭС проводилось при повышении напряжения в питающей сети до +16 % и снижении тока на нагрузке до −70 % от номинального значения. Как отмечалось выше, в рамках данной исследовательской работы рассматривается повышение напряжения в питающей сети до +16 % по шагам +2,5 %, а снижение тока на нагрузке до −70 % по шагам −10 % от номинального уровня. Ступенчатое повышение напряжения в питающей сети по шагам +2,5 % и снижение тока на нагрузке по шагам −10 % от номинального значения иллюстрируются на осциллограммах рис. 2–5 интервалами времени T2–T8. Важно подчеркнуть, что интервал времени T1 иллюстрирует работу СЭС при номинальном напряжении питающей сети и токе нагрузки. В [19, 20] более подробно рассматривалась стабилизация напряжения в СЭС с помощью предлагаемого устройства при ступенчатом изменении напряжения в питающей сети и тока на нагрузке.

Ниже приведены количественные оценки по улучшению функционирования предлагаемого регулятора напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах.

На осциллограммах рис. 2 приведены полученные результаты исследования коэффициента несинусоидальности напряжения на разных участках СЭС при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке до −70 % (рис. 2б) относительно номинального уровня. На осциллограммах рис. 2 и рис. 3 приведены соответствующие электрические параметры, такие как мгновенные значения токов и напряжений питающей сети (i_{pc} и u_{pc}), силового трансформатора (i_{ct} и u_{ct}) и нагрузки (i_h и u_h), действующие значения напряжения нагрузки (\bar{U}_h), а также коэффициенты несинусоидальности напряжения питающей сети K_{upc} , силового трансформатора K_{uct} и активно-индуктивной нагрузки K_{ue} . Результаты исследования коэффициента несинусоидальности напряжения питающей сети K_{upc} подтверждают, что предлагаемое техническое решение стабилизирует напряжения исследуемого объекта на заданном уровне, не искажает синусоидальность напряжения питающей сети при возникновении отклонений и колебаний напряжения и тока нагрузки.

Предлагаемое техническое решение также не искажает синусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки при номинальном напряжении питающей сети и токе нагрузки (интервал времени T1), повышении напряжения в питающей сети на +2,5 % и снижении тока на нагрузке на −10 % от номинального уровня (интервал времени T2), а также при повышении напряжения в питающей сети на +16 % и снижении тока на нагрузке на −70 % (интервал времени T8) относительно номинального значения. Стабилизируя напряжение на номинальном уровне, устройство незначительно искажает синусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки на интервале времени T3–T7. В конце интервала времени T2 и начале интервала времени T3 напряжение в питающей сети повышается на +5 % (рис. 2а). Ток на нагрузке снижается на −20 % (рис. 2б) от номинального уровня и создает необходимость изменения углов управления, проводящих состояний тиристорных ключей для создания падения напряжения на индуктивных сопротивлениях соответствующих реакторов, в результате чего напряжение в СЭС поддерживается на заданном уровне, создавая при этом несинусоидальности напряжения в силовом трансформаторе и на нагрузке на 2,8 % (рис. 2а) и 1,48 % (рис. 2б).

Интервал времени T4 иллюстрирует влияние заявляемого устройства на синусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки при повышении напряжения в питающей сети на +7,5 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке на −30 % (рис. 2б) от номинального значения. Предлагаемое устройство на этом интервале времени искажает синусоидальность напряжения силового трансформатора и нагрузки на 2,45 % (рис. 2а) и 1,5 % (рис. 2б). Коэффициенты несинусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки на интервале времени T5 составляют 3,6 % (рис. 2а) и 1,35 % (рис. 2б). Здесь устройство стабилизирует напряжение в СЭС при повышении напряжения в питающей сети на +10 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке на −40 % (рис. 2б) от номинального уровня [19].

На интервалах времени T6 и T7 коэффициенты несинусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки стремятся к нулю. Из интервала времени T6 видно, что коэффициенты

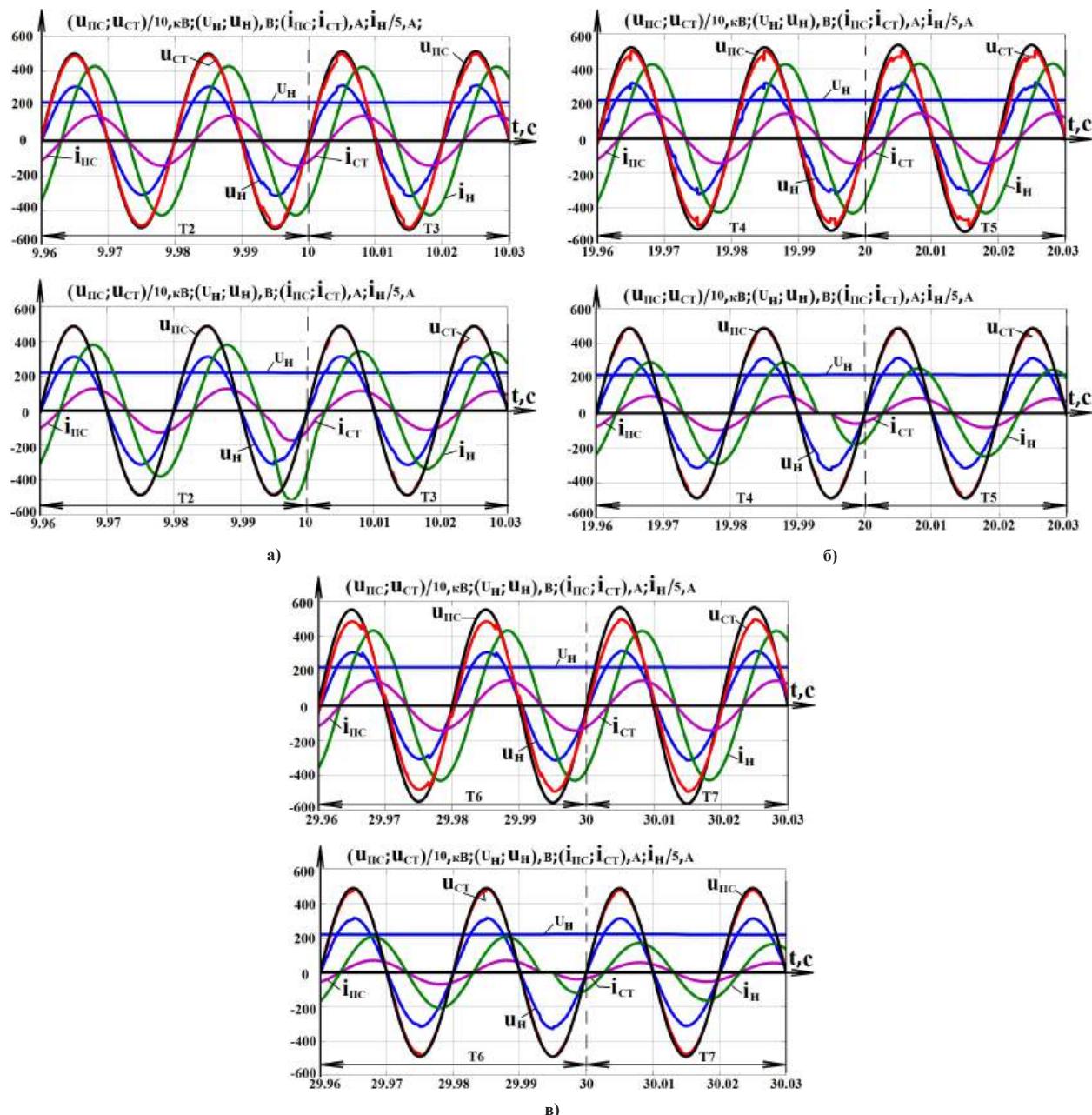


Рис. 3. Фрагменты осциллограмм токов и напряжений при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах:
а-в — при повышении напряжения питающей сети (сверху) и снижении нагрузки (снизу)

Fig. 3. Fragments of waveforms of currents and voltages during voltage regulation in wide ranges and ranges:
a-b — when the supply voltage increases (above) and the load decreases (below)

несинусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки на этом интервале времени составляет 3 % (рис. 2а) и 1 % (рис. 2б). Устройство на этом интервале времени поддерживает напряжения в СЭС на номинальном значении при повышении напряжения в питающей сети на +12,5 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке на -50 % (рис. 2б) относительно номинального уровня [19]. Новое техническое решение на интервале времени T7, то есть при повышении напряжения в питающей сети на +15 % (рис. 2а) и снижении тока на нагрузке на -60 % (рис. 2б), поддерживая номинальное значение напряжения на заданном уровне, искажает синусоидальность напряжения силового трансформатора и нагрузки на 0,87 % (рис. 2а) и 0,75 % (рис. 2б) соответственно. На осциллограммах рис. 2 время указано в секундах.

Как подтверждают полученные результаты исследования коэффициента несинусоидальности на-

прежения на разных участках СЭС, предлагаемое техническое решение, стабилизируя напряжения в СЭС на заданном уровне, создает максимальный уровень несинусоидальности напряжения в силовом трансформаторе и нагрузки на интервалах времени T5 (рис. 2а) и T4 (рис. 2б). Эти значения не выходят за нормально допустимые нормы, установленные отечественными [17] и зарубежными [18] ГОСТами.

Для иллюстрации возникновения искажения синусоидальности в кривых напряжениях СЭС на рис. 3 приводятся фрагменты мгновенных значений токов и напряжений. Как отмечалось выше, на этих фрагментах приведены мгновенные значения токов и напряжений питающей сети (i_{HC} и u_{HC}), силового трансформатора (i_{CT} и u_{CT}) и нагрузки (i_H и u_H), а также действующие значения напряжения нагрузки (U_H). На рис. 3 фрагменты, представленные сверху, иллюстрируют изменение величины

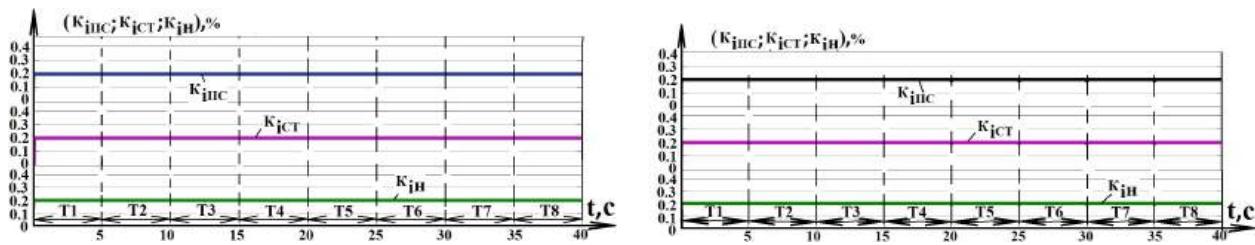


Рис. 4. Осциллограммы результатов исследования коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках системы электроснабжения: а — при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 %; б — при снижении тока нагрузки до -70 % от номинального значения

Fig. 4. Oscillograms results of a study of the distortion coefficient of the sinusoidal current in different sections of the power supply system: a — with a stepwise increase in the supply voltage to +16%; b — with a decrease in the load current to -70% of the nominal value

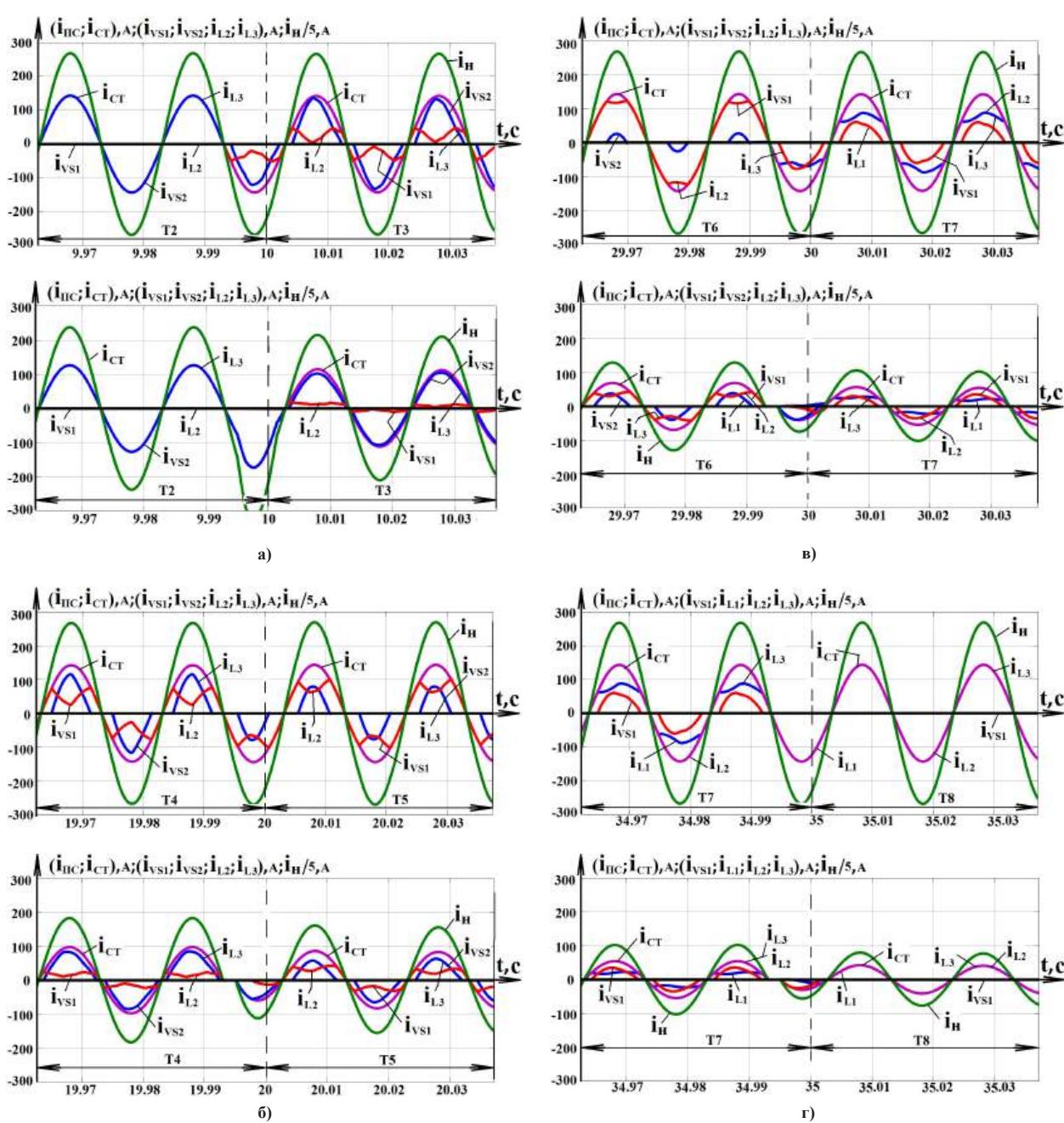


Рис. 5. Фрагменты мгновенных значений фазных токов на элементах системы электроснабжения и предлагаемого устройства при разных углах управления тиристорных ключей:

а-г — при повышении напряжения питающей сети (сверху) и снижении нагрузки (снизу)

Fig. 5. Fragments of instantaneous values of phase currents on the elements of the power supply system and the proposed device at different control angles of thyristor switches:
a-g — when the supply voltage increases (above) and the load decreases (below)

коэффициента несинусоидальности напряжения при повышении напряжения в питающей сети и номинальной нагрузке, а снизу — при снижении тока на нагрузке и номинальном напряжении в питающей сети. На рис. 3 более детально иллюстрируется изменение синусоидальности напряжения силового трансформатора и нагрузки при внезапном возникновении нестабильности напряжения в питающей сети (рис. 3а, в) и снижении тока на нагрузке [22] (рис. 3а, в). Важно подчеркнуть, что на этих осциллограммах приведены мгновенные значения фазных токов и напряжений фазы «А». На осциллограммах рис. 3 время также указано в секундах.

Фрагменты на рис. 3 доказывают, что новый регулятор напряжения, сохраняя номинальное напряжение в СЭС на заданном уровне, не только не искажает синусоидальность напряжения питающей сети при его регулировании в широких пределах и диапазонах, но и предотвращает возникновение перенапряжения на элементах питающей сети при снижении тока нагрузки (рис. 2б и 3, кривая $u_{\text{пс}}$). Это является одним из преимуществ заявляемого технического решения.

Осциллограммы на рис. 4 демонстрируют коэффициент искажения синусоидальности тока на разных элементах СЭС при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 % (рис. 4а) и снижении тока на нагрузке до -70 % (рис. 4б) от номинального значения. На этих осциллограммах (рис. 4) для демонстрации стабилизации напряжения (действующим значением напряжения нагрузки) при изменении напряжения в питающей сети и тока на нагрузке, а также для иллюстрации влияния реакторно-тиристорного устройства на синусоидальность токов СЭС представлены коэффициенты искажения синусоидальности тока питающей сети $K_{\text{пс}}$, силового трансформатора K_{ct} и нагрузки $K_{\text{н}}$. Результаты исследования коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках СЭС показали, что предлагаемый регулятор напряжения не искажает синусоидальности токов и сохраняет их синусоидальную форму, несмотря на широкие изменения углов управления тиристорных ключей для стабилизации напряжения при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16 % (рис. 4а) и снижении тока на нагрузке до -70 % (рис. 4б) от номинального уровня. Это также является еще одним из преимуществ заявляемого регулятора напряжения, которое позволяет повысить эффективность работы СЭС в стационарных и динамических режимах работы.

На рис. 5 для демонстрации искажения токов в СЭС и предлагаемом устройстве при регулировании напряжения в вышеуказанных пределах приводятся фрагменты мгновенных значений токов питающей сети ($i_{\text{пс}}$), силового трансформатора (i_{ct}) и нагрузки ($i_{\text{н}}$), а также мгновенных значений токов первых (i_{TK1}) и вторых (i_{TK2}) тиристорных ключах, первого (i_{L1}), второго (i_{L2}) и третьего (i_{L3}) реакторов. На этих фрагментах (рис. 5) сверху приведены мгновенные значения фазных токов фазы «А» при повышении напряжения в питающей сети и номинальной нагрузке, а снизу — при снижении тока на нагрузке и номинальном напряжении в питающей сети.

Фрагменты на рис. 5 подтверждают, что на всех интервалах времени (T2 до T8), несмотря на изменение углов управления тиристорных ключей в широких пределах, токи СЭС остаются синусоидальными, а токи предлагаемого устройства только

на интервалах времени T2 и T8 имеют синусоидальности, и в процессе стабилизации напряжения по мере изменения углов управления тиристорных ключей ток на элементах предлагаемого регулятора напряжения начинает искажаться в той или иной степени, а результирующий ток, который является током силового трансформатора (питающей сети), не искажается и сохраняет синусоидальную форму.

Заключение

Анализируя полученные результаты исследования коэффициента несинусоидальности напряжения и искажения тока в СЭС предлагаемым гибридным регулятором напряжения при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах, можно отметить следующее:

1. Разработана имитационная модель СЭС с предлагаемым регулятором напряжения и измерительными модулями для вычисления коэффициентов несинусоидальности напряжения и искажения тока на разных участках СЭС с целью оценки расширения функциональных возможностей нового регулятора напряжения.

2. Установлено, что заявляемое техническое решение полностью обеспечивает синусоидальность напряжения питающей сети при стабилизации напряжения в СЭС в случае повышения напряжения в питающей сети и снижения тока на нагрузке от номинального уровня. Устройство, поддерживающее номинальное напряжение в СЭС на заданном уровне, создает максимальное значение коэффициента несинусоидальности напряжения в силовом трансформаторе и на нагрузке на $K_u = 3,6\%$ при повышении напряжения в питающей сети и на $K_u = 1,5\%$ при снижении тока на нагрузке, что не выходит за нормально допустимые нормы, установленные отечественными и зарубежными ГОСТами.

Результаты исследования подтверждают, что предложенное техническое решение при регулировании напряжения в широких пределах и диапазонах не искажает синусоидальность токов СЭС, что приводит к повышению эффективности работы не только потребителей электроэнергии, но и силового трансформатора и питающей сети.

Список источников / References

1. Булатов Ю. Н., Крюков А. В., Суслов К. В. [и др.]. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогнозистическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, № 6. С. 3–13. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13. EDN: HQLXTA.

Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Suslov K. V. [et al.]. Soglasovannoye upravleniye nakopitelyami elektroenergii i ustanovkoj raspredelennoy generatsii s prognozisteskimi reguljatorami v sisteme elektronsnabzheniya s ponizhennym kachestvom elektroenergii [Coordinated management of electricity storages and distributed generation plant with predictive controllers in a power supply system with reduced electricity quality]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology. 2023. Vol. 25, no. 6. P. 3–13. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13. EDN: HQLXTA. (In Russ.).

2. Климан В. С., Константинов А. М. Устройство для повышения качества напряжения и энергетических показателей трансформаторных подстанций // Известия Тульского госу-

дарственного университета. Технические науки. 2019. № 9. С. 570–581. EDN: LTKRSG.

Klimash V. S., Konstantinov A. M. Ustroystvo dlya povysheniya kachestva napryazheniya i energeticheskikh pokazateley transformatornykh podstantsiy [Device for increasing voltage quality and energy indicators of transformer substations]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences. 2019. No. 9. P. 570–581. EDN: LTKRSG. (In Russ.).

3. Наумов А. А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 1. С. 85–92. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92. EDN: MTRTJG.

Naumov A. A. Obespecheniye trebuyemogo kachestva elektricheskoy energii [The required quality of electrical energy provision]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology. 2020. Vol. 22, no. 1. P. 85–92. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92. EDN: MTRTJG. (In Russ.).

4. Фетисов А. В., Роженцова Н. В., Булатов О. А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 11–12. С. 99–106. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106. EDN: YXRTWH.

Fetisov L. V., Rozhentsova N. V., Bulatov O. A. Povysheniye kachestva elektricheskoy energii v setyakh nizkogo napryazheniya [Improving the quality of electric power in low voltage networks]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology. 2018. Vol. 20, no. 11–12. P. 99–106. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106. EDN: YXRTWH. (In Russ.).

5. Al-Saeidi W., Lachowicz S. W., Habibi D. [et al.]. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using Particle Swarm Optimization. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2011. Vol. 42, no. 1-6. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2011.6257101.

6. Montoya F. G., Banos R., Gil C. [et al.]. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2010. Vol. 23. P. 695–703. DOI: 10.1016/j.engappai.2010.01.011.

7. Lumbreras D., Galvez E., Collado A. [et al.]. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review. Energies. 2020. Vol. 13. P. 5792. DOI: 10.3390/en13215792.

8. Солодухо Я. Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для её компенсации. Москва: Информэлектро, 1981. 89 с.

Solodukho Ya. Yu. Sostoyaniye i perspektivnye vnedreniya v elektroprivod staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti (obobshcheniye otechestvennogo i zarubezhnogo opyta). Reaktivnaya moshchnost' v setyakh s nesinusoidal'nyimi tokami i staticheskiye ustroystva dlya eye kompensatsii [The state and prospects of introducing static reactive power compensators into an electric drive (generalization of domestic and foreign experience). Reactive power in networks with non-sinusoidal currents and static devices for its compensation]. Moscow, 1981. 89 p. (In Russ.).

9. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I. [et al.]. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks. International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. Vol. 20. DOI: 10.1515/ijeps-2018-0269.

10. Ma J. Classification of power quality disturbances via deep learning. Journal of IETE, Technical Review. 2017. Vol. 34, no. 4. P. 408–415. DOI: 10.1080/02564602.2016.1196620.

11. Chernyshov M., Dovgun V., Temerbaev S. Hybrid power quality conditioner for three-phase four-wire power systems.

E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 178. P. 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801009.

12. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M. [et al.]. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study. Energies. 2021. Vol. 14. P. 1951. DOI: 10.3390/en14071951.13.

13. Moursi M., Joos G., Abbey C. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation. Power Electronics. 2008. P. 1178–1190. DOI: 10.1109/TPEL.2008.921195.

14. Haque M. H. Compensation of distribution system voltage Sag by DVR and D-STATCOM. Proceedings of IEEE Porto Power Tech. 2001. Vol. 5. 5 p. DOI: 10.1109/PTC.2001.964609.

15. Belyaev A. N., Smolovik S. V. An improvement of AC electrical energy transmission system with series compensation by implementation of controllable shunt reactors. Proceedings of IEEE Power Engineering Society PowerTech. 2003. Vol. 3. 6 p. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304526.

16. Табаров Б. Д. Исследование влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения системы электроснабжения // iPolytech Journal. 2024. Т. 28, № 3. С. 475–488. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-475-488. EDN: MMQUKA.

Tabarov B. D. Issledovaniye vliyaniya novogo upravlyayemogo regulyatora napryazheniya na nesinusoidal'nost' toka i napryazheniya sistemy elektrosnabzheniya [Influence of a new controlled voltage regulator on the current and voltage non-sinusoidality of a power supply system]. iPolytech Journal. 2024. Vol. 28, no. 3. P. 475–488. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-475-488. EDN: MMQUKA. (In Russ.).

17. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01–07–2014. Москва: Росстандарт, 2014. 16 с.

GOST 32144–2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. 2014. 16 p. (In Russ.).

18. ГОСТ IEC 61000-6-3–2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 6-3. Общие стандарты. Стандарт электромагнитной эмиссии для жилых, коммерческих и легких промышленных обстановок. Введ. 01–09–2017. Москва: Стандартинформ, 2020.15 с.

GOST IEC 61000-6-3–2016. Elektromagnitnaya sovmestimost' (EMS). Chast' 6-3. Obshchiye standarty. Standart elektromagnitnoy emissii dlya zhilykh, kommercheskikh i legkikh promyshlennyykh obstanovok [Electromagnetic compatibility (EMC). Part 6-3. Generic standards. Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments]. Moscow, 2020. 15 p. (In Russ.).

19. Пат. 2829330 С1 Российская Федерация, МПК H 02 M 5/25. Реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство на высокой стороне трансформаторной подстанции / Табаров Б. Д. № 2024114284; заявл. 24.05.2024; опубл. 30.10.2024. EDN: LAXNHD.

Patent No. 2829330 C1 Russian Federation, IPC H 02 M 5/25. Reaktorno-tiristornoye puskoreguliruyushcheye ustroystvo na vysokoy storone transformatornoy podstancii [Reactor-thyristor start-control device on high side of transformer substation] / Tabarov B. D. No. 2024114284. EDN: LAXNHD. (In Russ.).

20. Пат. 2834452 С1 Российская Федерация, МПК H 02 M 5/257, H 02 P 13/06. Способ управления реакторно-тиристорным пускорегулирующим устройством силового трансформатора / Табаров Б. Д. № 2024120821; заявл. 19.07.2024; опубл. 11.02.2025. EDN: IINBAU.

Patent No. 2834452 C1 Russian Federation, IPC H 02 M 5/257, H 02 P 13/06. Sposob upravleniya reaktorno-tiristornym puskoreguliruyushchim ustroystvom silovogo transformatora [Method of controlling reactor-thyristor control device of power

transformer] / Tabarov B. D. No. 2024120821. EDN: IINBAU. (In Russ.).

21. Климан С. В., Климан В. С., Власьевский С. В. Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде Matlab // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3(36). С. 11 – 16. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16. EDN: ZHLGNH.

Klimash S. V., Klimash V. S., Vlas'yevskiy S. V. Spetsializirovannyye moduli dlya issledovaniya energeticheskikh pokazateley elektrotehnicheskikh ustroystv v srede Matlab [Specialized modules for calculation of energy coefficients of electrical engineering devices in Matlab]. Elektrotehnicheskiye sistemy i kompleksy. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2017. No. 3(36). P. 11 – 16. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16. EDN: ZHLGNH. (In Russ.).

22. Табаров Б. Д. Принципы построения трансформаторной подстанции на основе управляемого реакторно-тиристорного устройства // *iPolytech Journal*. 2025. Т. 29, № 2. С. 252 – 269. DOI: 10.21285/1814-3520-2025-2-252-269. EDN: BQPAMI.

Tabarov B. D. Printsipy postroyeniya transformatornoy podstantsii na osnove upravlyayemogo reaktorno-tiristornogo ustroystvta [Design principles of a transformer substation using a thyristor-controlled reactor]. *iPolytech Journal*. 2025. Vol. 29, no. 2. P. 252 – 269. DOI: 10.21285/1814-3520-2025-2-252-269. EDN: BQPAMI. (In Russ.).

SPIN-код: 1493-7563

AuthorID (РИНЦ): 1059595

ORCID: 0000-0001-5878-3755

AuthorID (SCOPUS): 57206482446

ResearcherID: AAC-7453-2020

Адрес для переписки: behruz.tabarov@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025; одобрена после рецензирования 01.08.2025; принята к публикации 14.10.2025.

TABAROV Bekhruz Dovudkhodzhaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electric Drives and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur.

SPIN-code: 1493-7563

AuthorID (RSCI): 1059595

ORCID: 0000-0001-5878-3755

AuthorID (SCOPUS): 57206482446

ResearcherID: AAC-7453-2020

Correspondence address: behruz.tabarov@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 05.05.2025; approved after reviewing 01.08.2025; accepted for publication 14.10.2025.

ТАБАРОВ Бехруз Довудходжаевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, г. Комсомольск-на-Амуре.