

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.01

УДК 621.314

Б.Д. ТабаровКомсомольский-на-Амуре государственный университет,
Комсомольск-на-Амуре, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ С ОДНИМ ДВУХПОДДИАПАЗОННЫМ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Рассматривается вопрос непрерывного регулирования напряжения на высокой стороне двухтрансформаторной подстанции с одним двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения при изменении тока нагрузки и его влияния на показатели качества электроэнергии и эффективность энергопотребления в системах промышленного электропитания. **Цель исследования:** поддержание напряжения у потребителей на номинальном значении, уменьшение дополнительного расхода электроэнергии и повышение надежности питания потребителей при повышении тока нагрузки. В результате достижения поставленной цели улучшается эффективность работы силовых трансформаторов подстанции и потребителей электроэнергии, а также обеспечивается надежность питания и нормальная работа потребителей, сохраняется срок службы трансформаторов. **Практическая значимость** работы заключается в новом принципе построения двухтрансформаторной подстанции с одним двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения и способе непрерывного регулирования напряжения при изменении тока нагрузки. Для проведения исследований стационарных и динамических процессов двухтрансформаторной подстанции использовался **метод математического моделирования** с применением программного средства MatLab. На модели двухтрансформаторной подстанции выполнена апробация способа непрерывного регулирования напряжения на входе подстанции на основе предложенного регулятора напряжения. **Результаты:** исследование проводилось в среде MatLab на разработанной модели двухтрансформаторной подстанции с одним двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения мощностью 1000 кВ·А и напряжением 6 / 0,4 кВ при номинальном, промежуточном и максимальном уровне нагрузки. Результаты численных экспериментов в стационарных и динамических процессах подтверждали, что предлагаемый регулятор напряжения поддерживает уровень напряжения у потребителей на номинальном значении и сохраняет высокое значение энергетической эффективности установки.

Ключевые слова: двухтрансформаторная подстанция, коэффициент загрузки, высоковольтный выключатель, двухподдиапазонный реакторно-тиристорный регулятор напряжения, системы импульсно-фазового управления, активно-индуктивная нагрузка, выключатель нагрузки, качество электроэнергии и энергетические показатели.

B.D. Tabarov

Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

THE RESEARCH OF A TWO-TRANSFORMER SUBSTATION WITH ONE TWO-BAND REACTOR-THYRISTOR VOLTAGE REGULATOR

The article deals with the issue of continuous voltage regulation on the high side of a two-transformer substation with one two-band reactor-thyristor voltage regulator when the load current changes and its effect on electricity quality indicators and energy efficiency in industrial power supply systems. **The purpose of the study:** maintaining the voltage of consumers at the nominal value, reducing additional electricity consumption and improving the reliability of consumer power supply with increasing load current. As a result of achieving this goal, the efficiency of substation power transformers and electricity consumers is improved, as well as the reliability of power supply and normal operation of consumers are ensured and their service life is preserved. **The practical significance of the work** lies in the new principle of constructing a two-transformer substation with one two-band reactor-thyristor voltage regulator and a method of continuous voltage regulation when the load current changes. To conduct research on stationary and dynamic processes of a two-transformer substation, **the method of mathematical modeling** using MatLab software was used. On the model of a two-transformer substation, the method of continuous voltage regulation at the substation input was tested on the basis of the proposed voltage regulator. **Results:** the study was conducted in the MatLab environment on the developed model of a two-transformer substation with one dual-band reactor-thyristor voltage regulator with a capacity of 1000 kV·A and a voltage of 6 / 0,4 kV at nominal, intermediate and maximum load levels. The results of numerical experiments in stationary and dynamic processes confirmed that the proposed voltage regulator maintains the voltage level of consumers at the nominal value and maintains a high value of the energy efficiency of the installation.

Keywords: two-transformer substation, load factor, high-voltage switch, two-band reactor-thyristor voltage regulator, pulse-phase control systems, active-inductive load, load switch, power quality and energy indicators.

Введение

В настоящее время вопросы обеспечения нормальной работы и сохранения срока службы электрооборудования двухтрансформаторных подстанций и потребителей электрической энергии, а также уменьшение расхода электроэнергии и повышение надежности питания потребителей во всех отраслях системы электроснабжения являются актуальными [1–5]. Из опыта работы существующих двухтрансформаторных подстанций и графика электрических нагрузок предприятий, несмотря на применение существующих мероприятий и устройств по обеспечению нормальной работы и сохранению в целом

технико-экономических показателей установки, известно, что на сегодняшний день в производстве существуют проблемы, связанные с уменьшением расхода электроэнергии, обеспечением нормальной работы силовых трансформаторов подстанций и потребителей электроэнергии, улучшением качества электроэнергии и энергетической эффективности установки, а также сохранением срока службы электрооборудования подстанции и потребителей электроэнергии [6–8].

Среди основных причин возникновения этих проблем – отклонение и колебание нагрузки относительно ее номинального значения [9, 10]. Как известно из режима работы электрических сетей, отклонения и колебания нагрузки прежде всего влияют на номинальное напряжение установки, в результате чего ухудшается качество выпускаемой продукции, создаются дополнительные расходы электроэнергии и сокращаются сроки службы электрооборудования и потребителей электрической энергии [11, 12].

Следует отметить, что регулирование напряжения на существующих двухтрансформаторных подстанциях осуществляется дискретными способами при помощи известных механических регуляторов напряжения, которые не обеспечивают точности регулирования напряжения у потребителей [13, 14]. Это усложняет работу электрооборудования и создает или перенапряжение, или падение напряжения в цепи потребителей, в результате чего в целом ухудшаются технико-экономические показатели установки.

Для устранения вышеуказанных недостатков двухтрансформаторных подстанций в работе предлагается применить один двухдиапазонный реакторно-тиристорный регулятор напряжения на высокой стороне двухтрансформаторных подстанций взамен механических регуляторов напряжения типа переключения без возбуждения (ПВВ) и регулятора напряжения под нагрузкой (РПН).

Применение предлагаемого регулятора напряжения на двухтрансформаторных подстанциях упрощает конструкцию силовых трансформаторов, повышает точность регулирования напряжения, сокращает количество аварий в трансформаторах, уменьшает капитальные затраты на производство трансформаторов и эксплуатационные затраты на их обслуживание.

1. Разработка принципа построения двухтрансформаторной подстанции с одним двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения

Для достижения поставленной цели в работе ставились задачи разработки принципа построения двухтрансформаторной подстанции с одним двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения (ДР-ТРН) и проведения исследований стабилизации напряжения у потребителей при повышении тока нагрузки относительно номинального уровня. Предлагаемый регулятор напряжения, как и известные механические регуляторы напряжения, установлен на высокой стороне силовых трансформаторов СТ-1 и СТ-2 [15, 16] между сетевым выключателем Q1 и высоковольтными выключателями Q2 и Q3. На рис. 1 представлена функциональная схема двухтрансформаторной подстанции с одним ДР-ТРН. В состав схемы входят: трехфазная сеть (U_c), линия электропередачи (ЛЭП), сетевой выключатель (Q1), блок двухподдиапазонного реакторно-тиристорного регулятора напряжения (ДР-ТРН), высоковольтные выключатели Q1 и Q2, силовые трансформаторы СТ-1 и СТ-2, выключатели нагрузки Q4 и Q5, блок обратной связи (БОС) и активно-индуктивная нагрузка (Z). Блок двухподдиапазонного реакторно-тиристорного регулятора напряжения (ДР-ТРН) состоит из модулей основных и дополнительных тиристорных ключей (ТК-1 и ТК-2), системы импульсно-фазового управления СИФУ-1 и СИФУ-2, трёхфазного контактора (АС), основного (L1) и дополнительного (L2) реакторов.

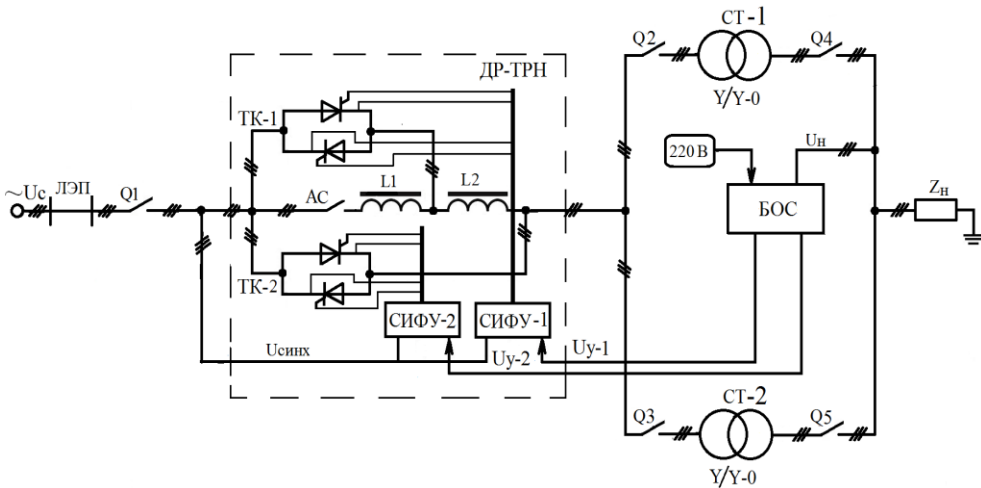


Рис. 1. Функциональная схема двухтрансформаторной подстанции с одним двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения

2. Принцип действия двухтрансформаторных подстанций с одним двухдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения

Операции включения и выключения силовых трансформаторов СТ-1 и СТ-2 осуществляются при помощи высоковольтных выключателей Q2 и Q3 после включения сетевого выключателя и модуля основных тиристорных ключей ТК-1 при выключенном трёхфазном контакторе АС и модуле дополнительных тиристорных ключей ТК-2. При подключении (отсоединении) шины распределительного устройства напряжение 0,4 кВ к силовым трансформаторам СТ-1 и СТ-2 достигается при помощи соответствующих выключателей нагрузки Q4 и Q5. Активно-индуктивные нагрузки подключают к шинам распределительного устройства или отсоединяют от них при помощи индивидуальных коммутационных аппаратов.

Поддержание напряжения потребителей двухтрансформаторных подстанций с одним ДР-ТРН на заданном уровне и улучшение их энергетических эффективностей при трех уровнях нагрузок достигается следующим образом. Под тремя уровнями нагрузок понимаются номинальная, промежуточная и максимальная нагрузки.

Номинальный уровень нагрузки. Поддержание напряжения у потребителей на заданном уровне при номинальном напряжении в сети и номинальной нагрузке достигается при помощи основных тиристорных ключей ТК-1 и дополнительного реактора L2. Дополнительные тиристорные ключи ТК-2 и основной реактор L1 при этом уровне нагрузки выключены. Основные тиристорные ключи ТК-1 при номинальной нагрузке полностью включены ($\alpha = 15$ град). Обеспечение питания потребителей на этом уровне осуществляется при помощи силового трансформатора СТ-1. Силовой трансформатор СТ-2 при этом уровне нагрузки находится в отключенном состоянии.

Промежуточный уровень нагрузки. Сохранение уровня напряжения у потребителей на заданном уровне при номинальном напряжении в сети и промежуточной нагрузке осуществляется при помощи основных ТК-1 и дополнительных ТК-2 тиристорных ключей, а также дополнительного реактора L2. Основной реактор L1 при этом выключен. Здесь основные тиристорные ключи ТК-1 полностью включены ($\alpha = 15$ град), а дополнительные тиристорные ключи частично шунтируют основные тиристорные ключи ТК-1 и дополнительный реактор

L2. Угол управления дополнительных тиристорных ключей ТК-2 при этом уровне нагрузки $\alpha = 40$ град. На этом промежуточном уровне нагрузки для обеспечения питания потребителей в работе используется силовой трансформатор СТ-1, а силовой трансформатор СТ-2 не подключен к питающей сети.

Максимальный уровень нагрузки. Поддержание уровня напряжения у потребителей на заданном значении до момента включения силового трансформатора СТ-2 при номинальном напряжении в сети и максимальной нагрузке обеспечивается при помощи дополнительных тиристорных ключей ТК-2, которые полностью шунтируют основные тиристорные ключи ТК-1 и дополнительный реактор L2. Основной реактор L1 при этом выключен. Угол управления дополнительных тиристорных ключей ТК-2 при этом уровне нагрузки $\alpha = 15$ град.

Стабильное сохранение напряжения у потребителей на заданном уровне после подключения силового трансформатора СТ-2 к питающей сети и распределение нагрузки между силовыми трансформаторами СТ-1 и СТ-2 при номинальном напряжении в сети и максимальной нагрузке обеспечиваются при помощи основных ТК-1 и дополнительных ТК-2 тиристорных ключей, а также дополнительного реактора L-2. Дополнительные тиристорные ключи ТК-2 при этом уровне нагрузки частично шунтируют основные тиристорные ключи ТК-1 и дополнительный реактор L-2 при угле управления $\alpha = 45$ град.

Предлагаемый регулятор напряжения также позволяет уменьшить расходы электроэнергии, обеспечить нормальный режим работы силовых трансформаторов и потребителей электроэнергии, а также улучшить их эффективность работы при уменьшении тока нагрузки. Это достигается при выполнении обратной последовательности.

3. Разработка имитационной модели двухтрансформаторной подстанции с одним двухдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения

Для проведения исследований стационарных и динамических процессов двухтрансформаторной подстанции с одним ДР-ТРН в среде MatLab была разработана блочно-модульная модель двухтрансформаторной подстанции [17]. Она показана на рис. 2 и содержит трехфазную сеть (U_a , U_b и U_c), линию электропередачи (ЛЭП), блок сетевого выключателя (Q1), модули основных (ТК-1) и дополнительных (ТК-2)

тиристорных ключей синхронизированных с сетями и с блоками систем импульсно-фазового управления СИФУ–1 и СИФУ–2, блок контактор (АС), основной (L1) и дополнительный (L2) реакторы, силовые трансформаторы СТ–1 и СТ–2, блок обратной связи (БОС), блоки высоковольтных выключателей Q2 и Q3 на входе первого и второго силового трансформатора, блоки выключателей нагрузки Q4 и Q5 и блок активно-индуктивной нагрузки (Z).

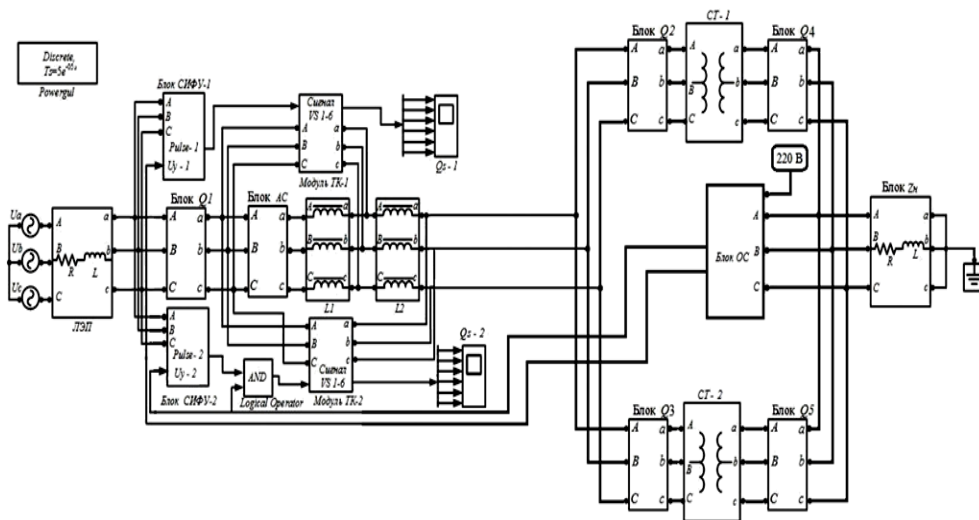


Рис. 2. Блочно-модульная модель двухтрансформаторной подстанции с одним двухдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения

Следует отметить, что блоки СИФУ–1 и СИФУ–2, а также модули ТК–1 и ТК–2 в развернутом виде представлены в работе [18, 19].

Как отмечалось в работе [18, 19], блоки СИФУ–1 и СИФУ–2 синхронизированы с сетью и предназначены для подачи команды на управляющие входы модулей основных ТК–1 и дополнительных ТК–2 тиристорных ключей с целью изменения их проводящего состояния и поддержания уровня напряжения у потребителей на номинальном значении при любом изменении напряжения питающей сети и тока нагрузки.

4. Результаты исследования двухтрансформаторной подстанции с предлагаемым регулятором напряжения

Рассмотрим результаты исследования непрерывного регулирования напряжения на входе двухтрансформаторной подстанции с одним ДР-ТРН с целью стабилизации напряжения у потребителей на задан-

ном уровне при разных уровнях тока нагрузки. Исследования проводились на двухтрансформаторной подстанции с одним ДР-ТРН, обеспечивающей питание активно-индуктивной нагрузки при $\varphi = 35$ град. Осциллограммы, приведенные на рис. 3, 4 и 5, иллюстрируют физические процессы при номинальном, промежуточном и максимальном уровне нагрузки. Кривые, приведенные на осциллограммах, обозначают: u_c и u_n – мгновенные значения напряжение сети и нагрузки; i_c и i_n – мгновенные значения тока сети и нагрузки; U_n – действующее значение напряжение нагрузки; i_{TK-1} и i_{TK-2} – мгновенные значения тока в основных и дополнительных тиристорных ключах; i_{L-2} – мгновенное значение тока в дополнительном реакторе; u_{CT-1} и u_{L-2} – мгновенные значения напряжение силового трансформатора СТ-1 и дополнительного реактора; Т-1, Т-2, Т-3 и Т-4 – интервалы времени, иллюстрирующие стабилизацию напряжения у потребителей при изменении тока нагрузки.

Номинальный уровень нагрузки. На интервале времени Т-1 силовой трансформатор СТ-1 работает на номинальной нагрузке, и напряжение у потребителей равно 220 В, угол управления тиристорами при этом $\alpha = 15$ град. Коэффициент загрузки силового трансформатора СТ-1 на этом интервале времени составляет 70 %. Как отмечалось выше, на интервале времени Т-1 в работе находятся основные тиристорные ключи ТК-1 и дополнительный реактор L2, а силовой трансформатор СТ-2, дополнительные тиристорные ключи ТК-2 и основной реактор L1 выключены.

Промежуточный уровень нагрузки. В конце интервала времени Т-1 и начале интервала времени Т-2 внезапно ток нагрузки возрастает на 35 %, и СТ-1 работает на коэффициент загрузки 105 %, напряжение у потребителей при этом снижается до 202 В и возникает необходимость регулирования напряжения на входе силового трансформатора для повышения напряжения в цепи потребителей до уровня 220 В. Это достигается за счет шунтирования дополнительного реактора L-2. С этой целью в начале интервала времени Т-2 в работу вводятся дополнительные тиристорные ключи ТК-2, которые позволяют частично шунтировать основные тиристорные ключи ТК-1 и дополнительный реактор L-2, в результате чего напряжение у потребителей повышается до номинального уровня. Угол управления дополнительных тиристорных ключей ТК-2 на этом интервале времени $\alpha = 40$ град.

Максимальный уровень нагрузки. В конце интервала времени Т-2 и начале интервала времени Т-3 внезапно ток нагрузки возрастает ещё на 35 % относительно промежуточного уровня нагрузки, и СТ-1 начинает работать на коэффициент загрузки 140 %, напряжение у потребителей при этом снижается от номинального уровня до 198 В, и возникает необходимость повысить напряжения у потребителей до уровня 220 В. Повышение напряжения у потребителей до номинального уровня на этом интервале достигается за счет полного шунтирования основных тиристорных ключей ТК-1 и дополнительного реактора L-2. Для этого в начале интервала времени Т-3 дополнительные тиристорные ключи ТК-2 полностью включаются, что позволяет полностью шунтировать основные тиристорные ключи ТК-1 и дополнительный реактор L-2, в результате чего напряжение у потребителей повышается до номинального уровня. Угол управления дополнительных тиристорных ключей ТК-2 на этом интервале времени $\alpha = 15$ град. Согласно ПУЭ время продолжительности работы силовых трансформаторов при коэффициенте загрузки 140 % зависит от их системы охлаждения [20]. Предлагаемый регулятор напряжения позволяет обеспечить не только точность регулирования напряжения, которой приводит к повышению качества выпускаемой продукции на производстве и сохранению срока службы электрооборудования установки, но и позволяет ещё уменьшить дополнительные расходы электроэнергии на время, в течение которого силовой трансформатор СТ-1 работает на коэффициент загрузки 140 % за счет отключенного состояния силового трансформатора СТ-2.

Как показывает осциллограмма на рис. 3, а, на интервале времени Т-3 коэффициент загрузки силового трансформатора СТ-1 в допущенное время нахождения в работе согласно ПУЭ не снижается ниже 140 %, и с целью сохранения срока службы силового трансформатора СТ-1 и обеспечения надежности питания потребителей электроэнергии в конце интервала времени Т-3 и в начале интервала времени Т-4 в работу вводится силовой трансформатор СТ-2, и нагрузка распределяется между СТ-1 и СТ-2. На этом интервале времени поддержание напряжения у потребителей на заданном уровне достигается при помощи основных ТК-1 и дополнительных ТК-2 тиристорных ключей, а также дополнительного реактора L-2. Дополнительные тиристорные ключи ТК-2 на этом интервале времени частично шунтируют основные тиристорные ключи ТК-1 и дополнительный реактор L-2 при угле управления $\alpha = 45$ град.

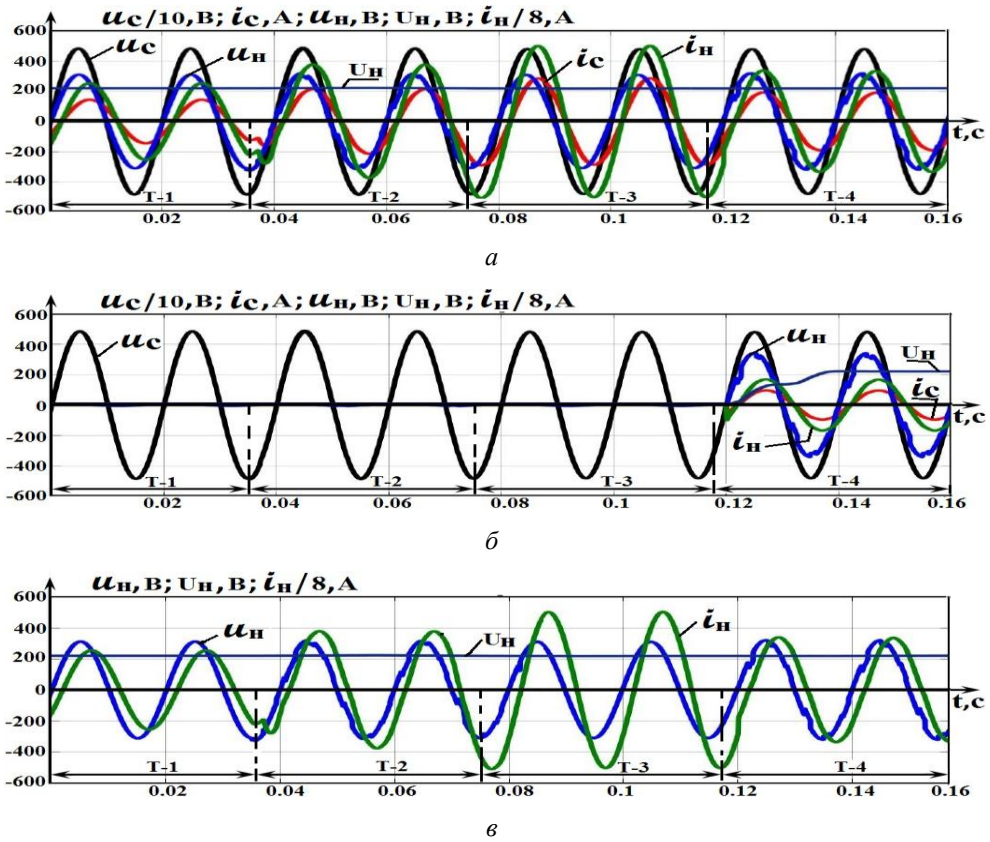


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжения при стабилизации напряжения у потребителей

На рис. 4, *а* приведены осциллограммы физических процессов при стабилизации напряжения у потребителей на силовом трансформаторе СТ-1 (*а*) и СТ-2 (*б*), а также на нагрузке (*в*) при трёх уровнях нагрузки. Как отмечалось выше, надписи на осциллограммах обозначают мгновенные значения тока и напряжения в сети, на силовых трансформаторах и на нагрузке.

Полученные результаты исследования в стационарных и динамических процессах, приведенные на рис. 3, подтверждают, что предлагаемый регулятор напряжения не только поддерживает уровень напряжения у потребителей на номинальном значении при внешних изменениях электрических параметров, но и сохраняет напряжение у потребителей на заданном уровне и при внутренних изменениях. Как видно из этих осциллограмм, несмотря на нестабильность нагрузки, напряжение всегда у потребителей равно номинальному значению.

На рис. 4 для большей наглядности физических процессов представлены фрагменты из стационарных процессов силового трансформатора СТ-1, которые показаны на рис. 3, а при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне.

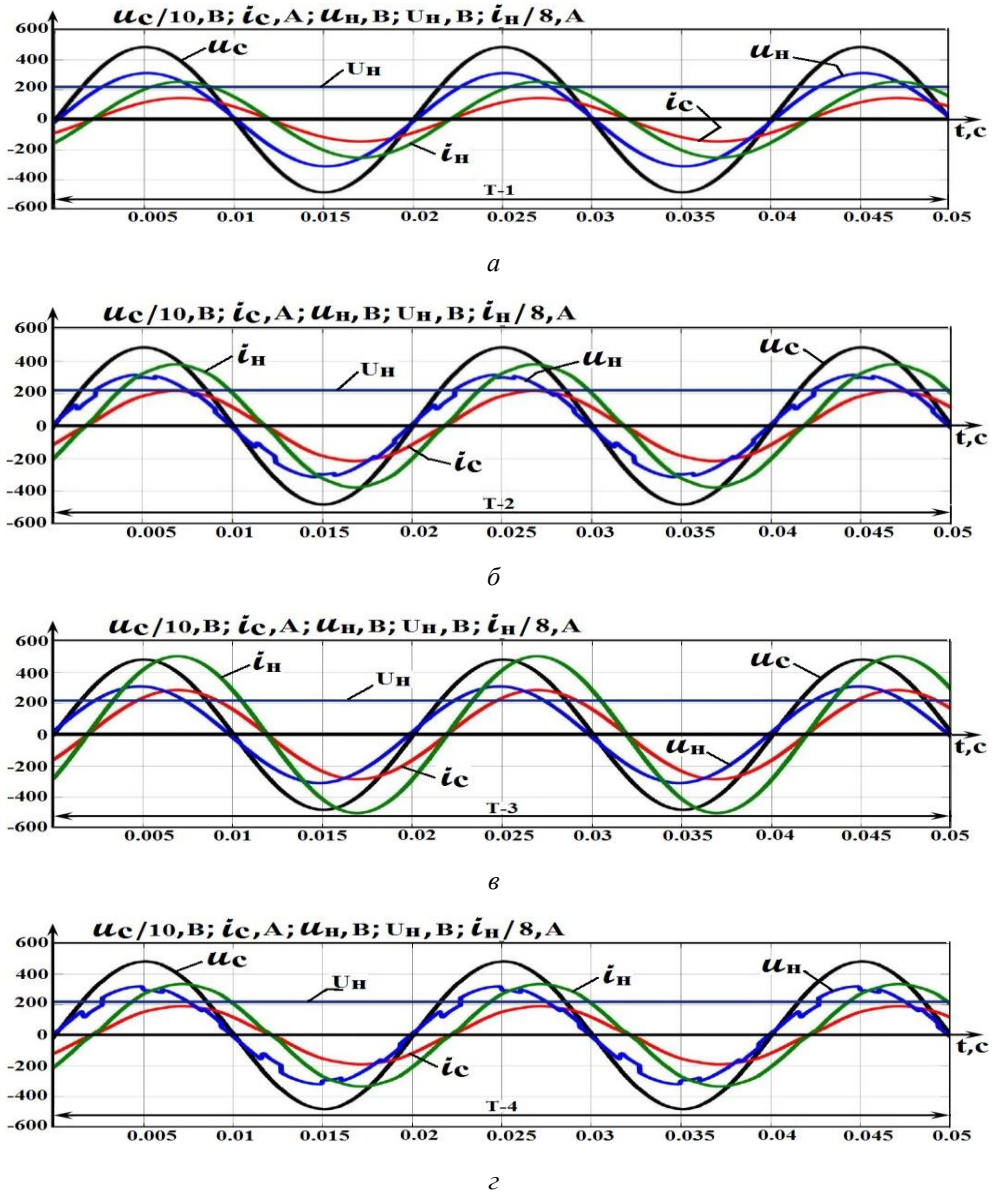


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжения силового трансформатора СТ-1 при номинальном (*a*), промежуточном (*б*) и максимальном (*в*, *г*) уровне нагрузки

Как видно из полученных результатов исследования стабилизации напряжения у потребителей на номинальном уровне при помощи одного двухподдиапазонного реакторно-тиристорного регулятора напряжения на высокой стороне двухтрансформаторной подстанции, несмотря на внешние и внутренние изменения электрических параметров, предлагаемый регулятор напряжения сохраняет качество электроэнергии с хорошими энергетическими показателями. Осциллограммы, приведенные на рис. 4, подтверждают, что предлагаемый регулятор напряжения не создает гармонических составляющих и не оказывает влияния на форму входного и выходного тока и напряжения через регулятор при номинальном (см. рис. 4, а) и максимальном (рис. 4, в) уровне нагрузки. Двухподдиапазонный реакторно-тиристорный регулятор напряжения при промежуточном (см. рис. 4, б) и максимальном (см. рис. 4, в) уровне нагрузки создает незначительные искажения на форме входного и выходного напряжения силовых трансформаторов подстанции.

Очередные осциллограммы иллюстрируют эффективность работы предлагаемого регулятора напряжения на двухтрансформаторных подстанциях при нестабильности графика электрической нагрузки всех отраслей промышленного комплекса системы электроснабжения и возможности его применения для замены известных механических регуляторов напряжения для повышения эффективности работы трансформаторных подстанций и потребителей электрической энергии.

На рис. 5 показаны результаты исследования, гармонические составляющие токов (см. рис. 5, а) и напряжений (см. рис. 5, б) при разных углах управления основных ТК-1 и дополнительных ТК-2 тиристорных ключей, которые иллюстрируют эффективность работы предлагаемого регулятора напряжения на двухтрансформаторных подстанциях и возможности сохранения технико-экономических показателей установок при стационарных и динамических процессах. На осциллограммах введены мгновенные значения тока сети (i_c), тока основных ($i_{ТК-1}$) и дополнительных ($i_{ТК-2}$) тиристорных ключей и дополнительно реактора (i_{L-2}), а также мгновенные значения напряжение сети (u_c), силового трансформатора СТ-1 $U_{СТ-1}$, дополнительного реактора L-2 и действующего значения напряжения на нагрузке U_n .

Как видно из результатов исследования гармонических составляющих токов и напряжения при разных уровнях нагрузок и углах

управления тиристорных ключей, предлагаемый двухподдиапазонный Р-ТРН на высокой стороне двухтрансформаторной подстанции не ухудшает форму входного и выходного тока через регулятор напряжения при всех углах управления тиристорных ключей. Осциллограмма (см. рис. 5, а) подтверждает, что форма тока, входящего и выходящего через регулятор напряжения, во всех интервалах времени (Т-1...Т-4) чисто синусоидальная. Регулятор напряжения создает незначительное искажение на форму тока тиристорных ключей и дополнительного реактора на интервале времени Т-2 и Т-4, а на остальных интервалах времени форма тока на этих элементах регулятора напряжения чисто синусоидальная. Полученные результаты исследования напряжения на рис. 5, б также показывают, что форма выходящего напряжения через регулятор напряжения при интервале времени Т-1 и Т-3 чисто синусоидальная, а в остальных интервалах (Т-2 и Т-4) незначительно искажается и входит в допущенные пределы, которые допускает ПУЭ [20].

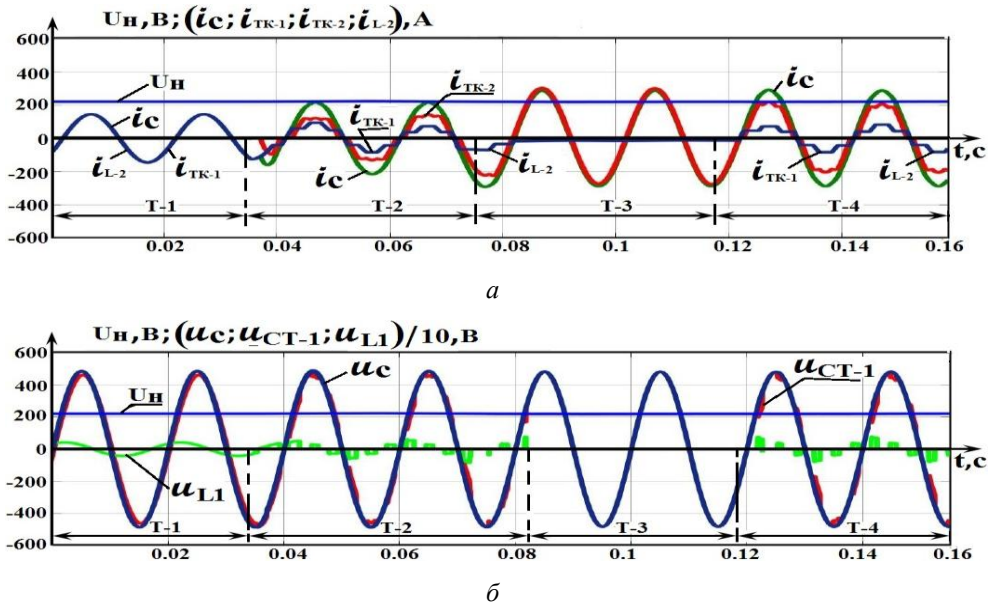


Рис. 5. Осциллограммы исследования гармонических составляющих токов и напряжения при разных уровнях нагрузок и углах управления тиристорных ключей

Следует отметить, что двухподдиапазонный Р-ТРН на высокой стороне двухтрансформаторной подстанции позволяет сохранять уровень напряжения у потребителей на номинальном значении при любом изменении значения тока нагрузки. Это подтверждает кривая действ-

вующего напряжения U_n , которая показана на всех осциллограммах и из которой видно, что при изменении тока нагрузки напряжение у потребителей остается постоянным.

Заключение

По результатам исследования стабилизации напряжения у потребителей на двухтрансформаторной подстанции с одним двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения при разных уровнях нагрузок можно сделать следующие выводы:

1. Применение двухподдиапазонного реакторно-тиристорного регулятора напряжения на высокой стороне двухтрансформаторной подстанции взамен известных механических регуляторов напряжения упрощает конструкцию силовых трансформаторов, повышает точность регулирования напряжения, сокращает количество аварий в трансформаторах, уменьшает капитальные затраты на производстве трансформаторов и эксплуатационные затраты на обслуживание.

2. Предлагаемый двухподдиапазонный реакторно-тиристорный регулятор напряжения на высокой стороне двухтрансформаторной подстанции обеспечивает непрерывное регулирование напряжения у потребителей и поддерживает его значение на номинальном уровне при изменении величины тока нагрузки с хорошими энергетическими показателями.

3. По результатам численного эксперимента установлено, что двухподдиапазонный реакторно-тиристорный регулятор напряжения при неравномерном графике нагрузки и стабилизации напряжения у потребителей сохраняет синусоидальную форму входного и выходного тока через регулятор напряжения и не оказывает отрицательного влияния на качество электроэнергии. Кроме этого также результатами исследования подтверждается, что предлагаемый регулятор напряжения только при промежуточном и максимальном (после включения резервного силового трансформатора в работе) уровне нагрузки создает незначительное искажение на форму выходного напряжения через регулятор, которое соответствует ГОСТу и не выходит за пределы допускаемой нормы.

4. Применение предлагаемого регулятора напряжения на входе двухтрансформаторной подстанции повышает надежность питания и по-

звolyет уменьшить также дополнительные расходы на электроэнергию при повышении коэффициента загрузки трансформатора до $KЗ = 140\%$ включительно относительно номинального значения на время, в течение которого ПУЭ допускает работу трансформатора при такой загруженности. Это достигается благодаря обеспечению непрерывного и точного регулирования напряжения при разных уровнях нагрузок.

Библиографический список

1. Гужов Н.П., Ольховский В.Я., Павлюченко Д.А. Системы электроснабжения: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 154.
2. Кабышев А.В. Электроснабжение объектов. Ч. 1: Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2007. – С. 185.
3. Карманова Т.Е. Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения: учеб. пособие / САФУ им. М.В. Ломоносова. – Архангельск, 2015. – С. 120.
4. Головкин П.И. Энергосистема и потребители электрической энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1979.
5. ГОСТ 113109-67. Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1967.
6. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практ. расчётов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – С. 173.
7. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – С. 472.
8. Адонц Г.Т., Арутюнян А.А. Методы расчёта и способы снижения расхода электроэнергии в электрических сетях энергосистем. – Ереван, 1986.
9. Зельцбург Л.М., Карпова Э.Л. О методике определения годовых нагрузочных потерь электроэнергии // Электричество. – 1989. – № 11. – С. 49–52.
10. Комлев Ю.М. Способ учёта корреляции графиков активной и реактивной нагрузки головного участка разомкнутой сети 6–110 кВ при расчёте потерь электроэнергии // Электричество. – 1985. – № 11. – С. 46–49.

11. Цигельман И.Е. Электроснабжение гражданских зданий и коммунальных предприятий: учебник для электромехан. спец. техникумов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 1988. – С. 319.

12. Сергеенков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: трансформаторы: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / под. ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1989. – С. 352.

13. Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

14. Мельников Н.А., Солдаткина Л.А. Регулирование напряжения в электрических сетях. – М.: Энергия, 1968. – С. 152.

15. Устройство для включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции: пат. 2667481 Рос. Федерация, МПК H02P 13/00 / Климаш В.С., Табаров Б.Д.; заявл. 14.12.2017; опубл. 20.09.2018. Бюл. № 26.

16. Способ включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции: пат. 2622890 Рос. Федерация, МПК H02P 13/00. Климаш В.С., Табаров Б.Д.; заявл. 20.10.2016; опубл. 21.06.17. Бюл. № 18.

17. Блочно-модульная модель двухтрансформаторной подстанции с двухдиапазонным реакторно-тиристорным устройством: св-во РФ № 2022611670 о регистрации программ для ЭВМ / Климаш В.С., Табаров Б.Д.; опубл. 31.01.2021. Бюл. № 2.

18. Klimash V.S., Tabarov B.D. The Method and Structure of Switching on and off, and Regulating the Voltage of a Transformer Substation // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – P. 18393187. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602876

19. Klimash V.S., Tabarov B.D. Application of a reactor-thyristor device at a transformer substation // Lecture notes in networks and systems. – Germany, 2021. – P. 614–621.

20. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (принят Межгос. советом по стандарт., методолог. и сертифици., протокол №55-П от 25 марта 2013 г.). – М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.

References

1. Guzhov N.P., Ol'khovskii V.Ia., Pavliuchenko D.A. Sistemy elektrosnabzheniia [Receivers and consumers of electric energy of power supply systems]. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2006, 154 p.

2. Kabyshev A.V. Elektrosnabzhenie ob"ektov. Chast' 1: Raschet elektricheskikh nagruzok, nagrev provodnikov i elektrooborudovaniia [Power supply of facilities. Part 1. Calculation of electrical loads, heating of conductors and electrical equipment]. Tomsk: Tomsk. politekhnicheskii universitet, 2007, 185 p.

3. Karmanova T.E. Priemniki i potrebiteli elektricheskoi energii sistem elektrosnabzheniia [Receivers and consumers of electrical energy of power supply systems]. Arkhangel'sk: Severnyi Arkticheskii federal'nyi universitet imeni M.V. Lomonosova, 2015, 120 p.

4. Golovkin P.I. Energosistema i potrebiteli elektricheskoi energii [Power system and consumers of electric energy]. Moscow: Energoatomizdat, 1979.

5. GOST 113109-67. Normy kachestva elektricheskoi energii u ee priemnikov, prisoedinennykh k elektricheskim setiam obshchego naznacheniiia [Norms of the quality of electrical energy at its receivers connected to general-purpose electrical networks]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1967.

6. Zhelezko Iu.S. Vyor meropriiatii po snizheniiu poter' elektroenergii v elektricheskikh setiakh: rukovodstvo dlia prakt. raschetov [The choice of measures to reduce electricity losses in electric networks a guide for practical calculations]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 173 p.

7. Fedorov A.A., Kameneva V.V. Osnovy elektrosnabzheniia promyshlennykh predpriiatii [Fundamentals of power supply of industrial enterprises]. 4nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 472 p.

8. Adonts G.T., Arutiunian A.A. Metody rascheta i sposoby snizheniia raskhoda elektroenergii v elektricheskikh setiakh energosistem [Calculation methods and methods of reducing electricity consumption in electric networks of power systems]. Erevan, 1986.

9. Zel'tsburg L.M., Karpova E.L. O metodike opredeleniia godovykh nagruzochnykh poter' elektroenergii [On the methodology for determining the annual load losses of electricity]. *Elektrichestvo*, 1989, no. 11, pp. 49-52.

10. Komlev Iu.M. Sposob ucheta korreliatsii grafikov aktivnoi i reaktivnoi nagruzki golovnogo uchastka razomknutoi seti 6-110 kV pri

raschete poter' elektroenergii [Method of accounting for the correlation of active and reactive load graphs of the head section of an open network of 6-110 kV when calculating electricity losses]. *Elektrichestvo*, 1985, no. 11, pp. 46-49.

11. Tsigel'man I.E. Elektrosnabzhenie grazhdanskii zdanii i kommunal'nykh predpriatii: uchebnik dlia elektromekhanicheskikh spetsial'nostei tekhnikumov [Power supply of civil buildings and municipal enterprises: textbook for electromechanical special technical schools]. 3rd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 1988, 319 p.

12. Sergeenkov B.N., Kiselev V.M., Akimova N.A. Elektricheskie mashiny: transformatory: uchebnoe posobie dlia elektromekhanicheskikh spetsial'nostei vuzov [Electric machines: Transformers: textbook for electromechanical specialties of universities]. Ed. I.P. Kopylov. Moscow: Vysshaia shkola, 1989, 352 p.

13. Markushevich N.S. Regulirovanie napriazheniia i ekonomiiia elektroenergii [Voltage regulation and energy saving]. Moscow: Energoatomizdat, 1984.

14. Mel'nikov N.A., Soldatkina L.A. Regulirovanie napriazheniia v elektricheskikh setiakh [Voltage regulation in electric networks]. Moscow: Energiia, 1968, 152 p.

15. Klimash V.S., Tabarov B.D. Ustroistvo dlia vklucheniia, vykliucheniia i regulirovaniia napriazheniia transformatornoi podstantsii [A device for switching on, off and regulating the voltage of a transformer substation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2667481 (2018).

16. Klimash V.S., Tabarov B.D. Sposob vklucheniia, vykliucheniia i regulirovaniia napriazheniia transformatornoi podstantsii [The method of switching on, off and regulating the voltage of a transformer substation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2622890 (2017).

17. Klimash V.S., Tabarov B.D. Blochno-modul'naia model' dvukhtransformatornoi podstantsii s dvukhpoddiapazonnym reaktorno-tiristornym ustroistvom [Block-modular model of a two-transformer substation with a two-band reactor-thyristor device]. Svidetel'stvo o registratsii programm dlia EVM Rossiiskaia Federatsiia 2022611670 (2021).

18. Klimash V.S., Tabarov B.D. The Method and Structure of Switching on and off, and Regulating the Voltage of a Transformer

Substation. *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2018, 18393187 p. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602876

19. Klimash V.S., Tabarov B.D. Application of a reactor-thyristor device at a transformer substation. *Lecture notes in networks and systems*. Germany, 2021, pp. 614-621.

20. GOST 32144-2013. Elektricheskaja energija. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaia. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia [GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow: Standartinform, 2014, 16 p.

Сведения об авторе

Табаров Бехруз Довудходжаевич (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, e-mail: office@knastu.ru).

About the author

Behruz D. Tabarov (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Industrial Installations at Komsomolsk-on-Amur State University (681013, Khabarovsk Krai, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenin ave., e-mail: office@knastu.ru).

Поступила: 30.09.2022. Одобрена: 27.10.2022. Принята к публикации: 01.12.2022.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (№ гранта: МК-3799.2022.4).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Работа была выполнена в индивидуальном авторстве.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Табаров, Б.Д. Исследование двухтрансформаторной подстанции с одним двухдиапазонным реакторно-тиристорным регулятором напряжения / Б.Д. Табаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 44. – С. 5–24. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.01

Please cite this article in English as:

Tabarov B.D. The research of a two-transformer substation with one two-band reactor-thyristor voltage regulator. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 44, pp. 5-24. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.01