

УДК 621.314

В.С. Климаш, Б.Д. ТабаровКомсомольский-на-Амуре государственный университет,
Комсомольск-на-Амуре, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ
С ДВУХПОДДИАПАЗОННЫМ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНЫМ
РЕГУЛИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ**

Рассмотрены проблемы, связанные с загрузкой электрических сетей реактивной мощностью и питанием промышленных потребителей напряжением низкого качества. Для решения этих проблем предложено устройство на основе реакторно-тиристорных ключей на высокой стороне трансформаторной подстанции, которое совместно с батареей конденсаторов повышает пропускную способность электрических сетей и выравнивает напряжение у потребителей. Для расширения функциональных возможностей реакторно-тиристорных ключей предложен способ управления, обеспечивающий двухподдиапазонное непрерывное регулирование напряжения у потребителей с улучшенной формой напряжения нагрузки и тока сети, а также безударное включение трансформаторной подстанции под нагрузкой и отключение её без возникновения электрической дуги на механических контактах электрических аппаратов. Для исследования предлагаемого устройства в комплекте с трансформаторной подстанцией выполнен ряд опытов на математической модели в среде MatLab. Анализ результатов этих опытов в стационарных и динамических режимах работы показал целесообразность применения разработанных технических решений для системы промышленного электроснабжения. Осциллограммами физических процессов на модели показано, что при изменении напряжения в сети и тока нагрузки устройство обеспечивает стабильное напряжение у потребителей на требуемом уровне, не создавая при этом сдвига фазы тока сети относительно напряжения. Приводятся характеристики для трансформаторной подстанции по штатной схеме и с двухподдиапазонным регулирующим устройством. Предложенный способ и устройство для его реализации на основе реакторно-тиристорных ключей и конденсаторной батареи позволяют при стабилизации напряжения у потребителей сохранять синусоидальность формы тока в силовом трансформаторе и в сети.

Ключевые слова: реакторно-тиристорные ключи, батарея конденсаторов, трансформаторная подстанция, динамика включения и выключения трансформатора, статические характеристики, математическая модель.

V.S. Klimash, B.D. Tabarov

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

RESEARCH OF TRANSFORMER SUBSTATION IN COMPLETE WITH TWO SUB-BANDS REACTOR-THYRIST CONTROLLER DEVICE

The problems associated with the loading of electric networks with reactive power and low-quality power supply to industrial consumers are considered. To solve these problems, a device based on reactor-thyristor keys on the high side of the transformer substation is proposed, which together with a capacitor bank increases the capacity of electric networks and equalizes the voltage at consumers. To expand the functionality of reactor-thyristor switches, a control method is proposed that provides two-band continuous voltage regulation for consumers with an improved form of load voltage and current, as well as shock-free switching on of a transformer substation under load and its disconnection without the appearance of an electric arc on the mechanical contacts of electrical devices. For the study of the proposed device, complete with a transformer substation, a number of experiments on a mathematical model in the MatLab environment were performed. Analysis of the results of these experiments in stationary and dynamic modes of operation, showed the feasibility of the application of the developed technical solutions for the industrial power supply system. Oscillograms of physical processes on the model show that when the voltage in the network and the load current changes, the device provides a stable voltage at the required level, without creating a shift in the phase of the network current relative to the voltage. Describes the characteristics for the transformer substation in the nominal and with two sub-bands controller device. The proposed method and device for its implementation on the basis of reactor-thyristor keys and a capacitor bank allows for voltage stabilization in consumers, maintain the sinusoidal current in the power transformer and in the network.

Keywords: reactor-thyristor switches, capacitor bank, transformer substation, transformer on and off dynamics, static characteristics and simulation model.

Введение. Существующие трансформаторные подстанции (ТП) промышленных предприятий оснащаются электрическими аппаратами с механическими контактами [1–6], которые не обеспечивают безударного включения силового трансформатора, выключения его без дуги на контактах выключателя и непрерывное регулирование напряжения на входе силового трансформатора и у потребителей электроэнергии. К недостатком также следует отнести и то, что применение на существующих трансформаторных подстанциях конденсаторных батарей (БК) [7–18] создаёт дополнительные потери в системе электроснабжения от флуктуаций фазы тока сети при отклонениях и колебаниях напряжения в сети. Устранению этих недостатков посвящена данная работа, в которой предлагаются способ и устройство включения, выключения силового трансформатора и регулирования напряжения и индуктивности на входе ТП для стабилизации напряжения у потребителей и фазы тока в сети.

Цель работы – улучшение энергетических показателей электропередачи за счет расширения функциональных возможностей и регулировочных свойств ТП.

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

1. Математическое моделирование трансформаторной подстанции с применением реакторно-тиристорных ключей (РТК) и БК для регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности.

2. Исследование физических процессов и поиск технических решений для улучшения энергетических и регулировочных характеристик ТП.

3. Проведение численных экспериментов на математической модели с применением нового технического решения для ТП.

1. Разработка устройства. Предложенное пускорегулирующее устройство включается между сетевым высоковольтным выключателем $Q1$ и первичной обмоткой силового трансформатора подстанции.

Предложенная схема устройства в составе ТП приведена на рис. 1. Она содержит трёхфазную сеть G , линию электропередачи W , основной высоковольтный выключатель $Q1$ на входе ТП, дополнительный высоковольтный выключатель $Q2$ в цепи БК, основные $VS1$ и дополнительные $VS2$ тиристорные ключи с системой управления CU , которые для применения в высоковольтных цепях выполнены с дополнительными диодами, контактор AC , основной $LR1$ и дополнительный $LR2$ реакторы, силовой трансформатор CT и активно-индуктивную нагрузку Z .

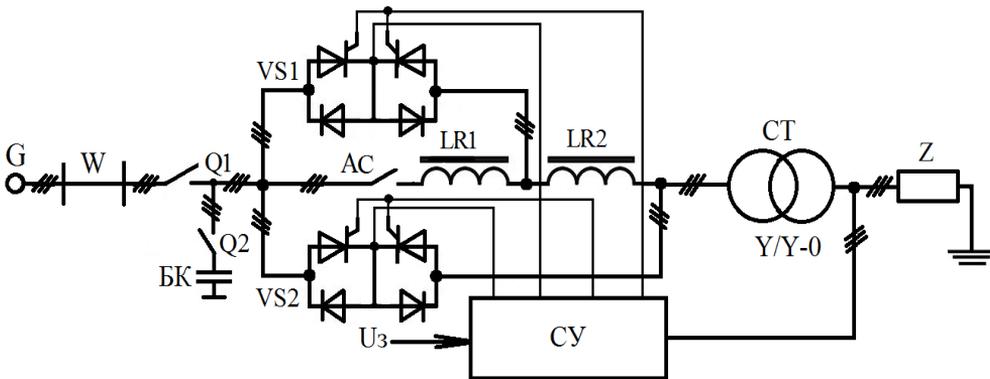


Рис. 1. Функциональная схема трансформаторной подстанции с предлагаемым устройством

Включение силового трансформатора СТ производят при полностью выключенных дополнительных тиристорных ключах $VS2$. При этом сначала двумя основными тиристорными ключами $VS1$ через дополнительный реактор $LR2$ подключают две фазы его первичной обмотки к соответствующим фазам сети G в момент перехода фазного напряжения третьей фазы сети G через ноль, затем третьим основным тиристорным ключом $VS1$ подключают третью фазу первичной обмотки силового трансформатора СТ к третьей фазе сети в момент перехода линейного напряжения двух других фаз сети через ноль. В завершение процесса включения силового трансформатора СТ с одновременной подготовкой подстанции к регулированию напряжения, параллельно полностью открытым основным тиристорным ключам $VS1$ посредством трехфазного контактора АС подключают основной реактор $LR1$. Затем при изменении проводящего состояния тиристоров начинают процесс регулирования напряжения как вверх, так и вниз относительно напряжения сети. Верхний предел задаётся коэффициентом трансформации силового трансформатора, а нижний предел – сопротивлением реактора.

Предлагаемый способ управления реакторно-тиристорными ключами обеспечивает регулирование напряжения на входе силового трансформатора относительно напряжения сети и у потребителей между заданными пределами регулирования: максимальным и минимальным, разделёнными номинальным уровнем.

Максимальный предел регулирования напряжения на нагрузке силового трансформатора задают коэффициентом трансформации силового трансформатора СТ при полностью выключенных основных ключах $VS1$ и полностью включенных дополнительных тиристорных ключах $VS2$ при пониженном напряжении в сети G . Дополнительные тиристорные ключи $VS2$ в этот момент шунтируют основной $LR1$ и дополнительный $LR2$ реакторы в цепи первичной обмотке силового трансформатора СТ.

Номинальный уровень напряжения на нагрузке обеспечивается при полностью включенных основных ключах $VS1$, которые шунтируют основной реактор $LR1$, и полностью выключенных дополнительных тиристорных ключах $VS2$ при номинальном напряжении сети G и номинальной нагрузке Z .

Минимальный предел регулирования на нагрузке задают суммарным сопротивлением основной $LR1$ и дополнительный $LR2$ реактор

при полностью закрытых основных $VS1$ и дополнительных $VS2$ тиристорных ключах при повышенном напряжении в сети G и номинальной нагрузке Z . Способ также предусматривает разделение диапазона регулирования напряжения на два поддиапазона: верхний и нижний.

Верхний поддиапазон регулирования находится между максимальным пределом и номинальным уровнем, а нижний между номинальным уровнем и минимальным пределом регулирования напряжения. При работе между верхним и нижним поддиапазонами регулирования напряжения введена зона нечувствительности на изменение проводящего состояния как основных, так и дополнительных тиристорных ключей, при которой отклонения напряжения на нагрузке как вверх, так и вниз от номинального уровня не превышают допустимых значений.

Изменением проводящего состояния дополнительных тиристорных ключей $VS2$ производится регулирование напряжения в нижнем поддиапазоне от промежуточного (номинального) уровня до минимального предела регулирования, а изменением проводящего состояния основных тиристорных ключей $VS1$ производится регулирование напряжения в верхнем поддиапазоне от промежуточного (номинального) до максимального предела регулирования напряжения.

Выключение силового трансформатора СТ подстанции без возникновения электрической дуги и коммутационных перенапряжений производят следующим образом.

Перед выключения силового трансформатора сначала снимаются импульсы с дополнительных тиристорных ключей $VS2$. Затем основные тиристорные ключи $VS1$ переводят в полностью открытое состояние и обнуляют ток через контакты трехфазного контактора АС и основного реактора $LR1$. Затем трехфазным контактором АС отключают обесточенный основной реактор $LR1$ без возникновения электрической дуги и перенапряжений. На завершающей операции снимают управляющие импульсы с основных тиристорных ключей $VS1$ с естественной коммутацией, и они выключаются естественным путем без коммутационных потерь.

Трансформаторные подстанции с пускорегулирующими устройствами предназначают взамен трансформаторных подстанций с механическим регулированием напряжения типа регулятор напряжения под нагрузкой (РПН).

Для исследования известной и новой схемы трансформаторной подстанции разработан программный комплекс в среде MatLab [19].

2. Результаты исследований трансформаторной подстанции с РТК и БК. Исследования физических процессов ТП в комплекте с РТК и БК выполнены на математической модели. При моделировании рассмотрены следующие процессы:

1. При питании ТП напряжениями трёх уровней: максимальном, номинальном и минимальном. Результаты этих исследований приведены на рис. 2.

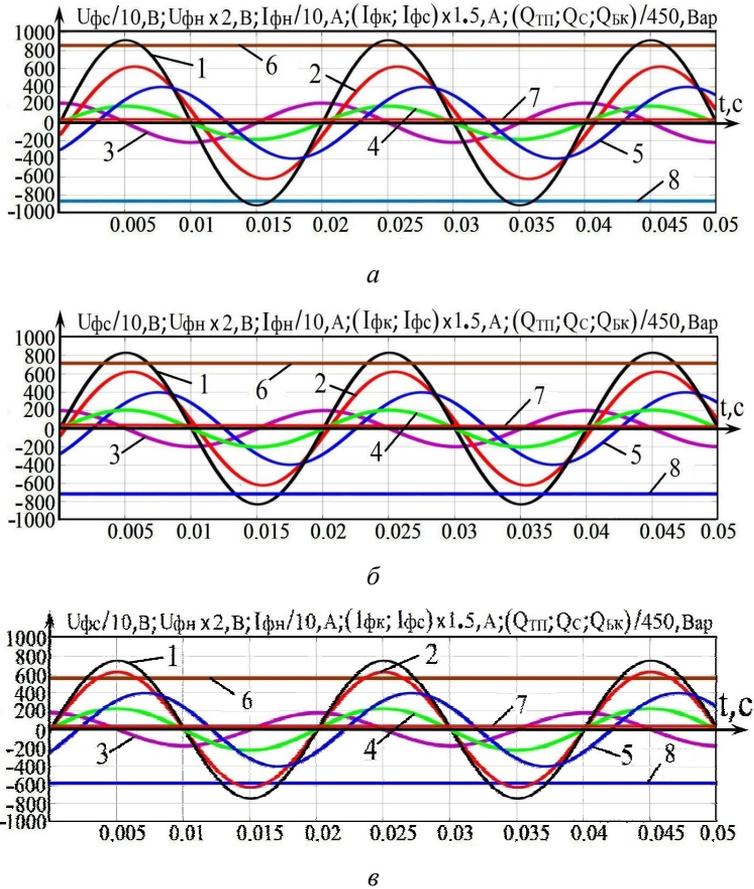


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжения при разных уровнях напряжения сети: максимальном (а), номинальном (б) и минимальном (в)

2. При работе ТП в верхнем и нижнем поддиапазонах регулирования напряжения. Осциллограммы этих исследований приведены на рис. 3.

На осциллограммах (рис. 2 и 3) введены следующие обозначения: 1 и 2 – фазные напряжения сети и нагрузки; 3, 4 и 5 – фазные токи конденсатора, сети и нагрузки; 6, 7 и 8 – реактивные мощности трансформаторной

подстанции $Q_{ТП}$ в комплекте с РТК, сети Q_C и конденсаторной батареи $Q_{БК}$. Повышение (понижение) напряжения в сети приводит к повышению (понижению) напряжения у потребителей и возрастанию (снижению) генерируемой реактивной мощности БК.

Посредством РТК на входе ТП регулируются индуктивное сопротивление реакторов и падение напряжения на них. В зависимости от величины положительных и отрицательных отклонений напряжения на входе подстанции необходимо индивидуально выбирать сопротивления основного и дополнительного реакторов. Это способствует достижению высокого качества напряжения на нагрузке.

Следует обратить внимание, что реактивная мощность конденсаторов зависит от изменения величины питающего напряжения, и на то, что в процессе стабилизации напряжения у потребителей при помощи тиристоров регулируется индуктивное сопротивление реакторов. При повышении (снижении) напряжения в сети происходит увеличение (уменьшение) индуктивного сопротивления реакторов, нейтрализующее изменение реактивной мощности конденсаторов и фазы тока сети. Это одно из замечательных свойств предложенного устройства.

На осциллограммах (рис. 3) показано регулирование напряжения в верхнем и нижнем поддиапазонах.

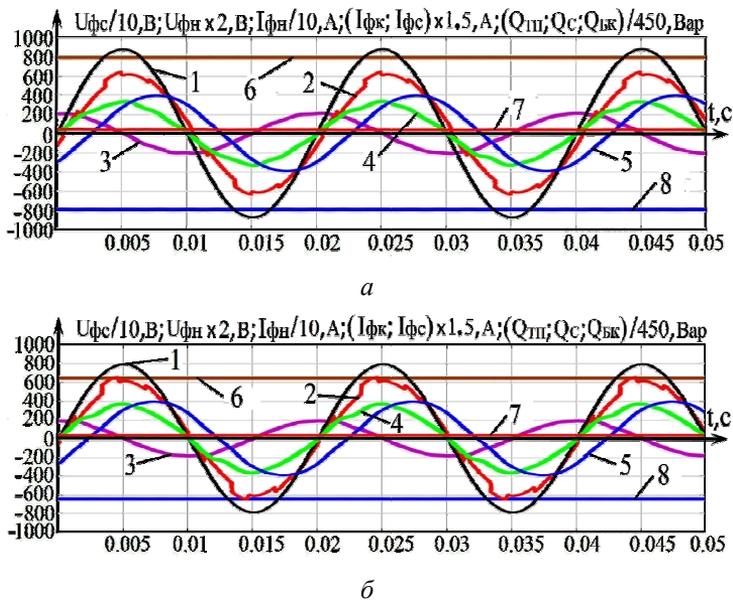


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжения в верхнем (а) и нижнем (б) поддиапазонах регулирования напряжения

Анализируя эти осциллограммы, видно, что форма тока сети искажается незначительно, а его фаза совпадает с напряжением сети, что обуславливает высокую эффективность потребления электроэнергии трансформаторной подстанцией.

Реакторно-тиристорные ключи предназначены не только для регулирования напряжения ТП, но и для безударного включения силовых трансформаторов под нагрузкой и выключения без возникновения дуги на контактах высоковольтных выключателей [20–23].

Исследованиями РТК установлено, что регулирование напряжения на высокой стороне ТП не оказывает отрицательного влияния на форму тока сети. Результаты этого исследования проиллюстрированы на рис. 4 при следующих обозначениях: 1 и 2 – фазные токи сети и дополнительный реактор; 3 – фазный ток основного тиристорного ключа.

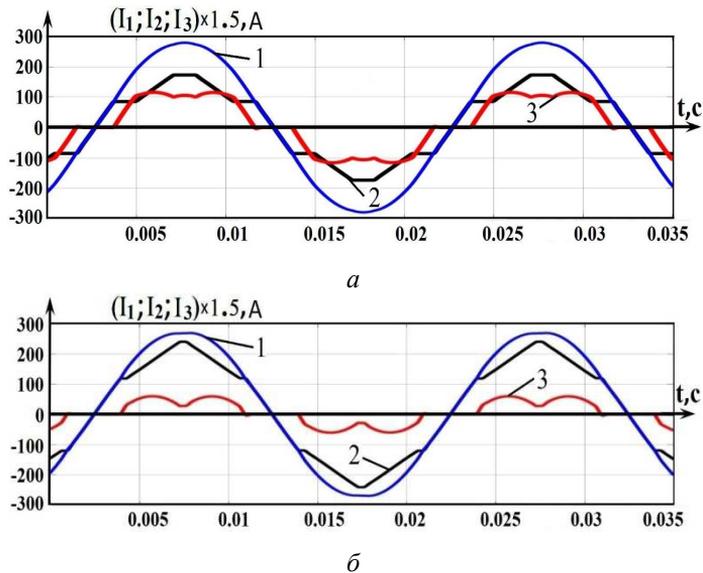


Рис. 4. Осциллограммы токов при разных углах управления тиристорами

Из осциллограмм (рис. 4) видно, что токи тиристорov и реакторов искажаются, а их сумма, являясь током сети и током силового трансформатора, сохраняет синусоидальную форму при любых углах управления. Это ещё одно замечательное свойство устройства, которое в процессе регулирования не создаёт дополнительных потерь в силовом трансформаторе и в сети.

На рис. 5 приведены осциллограммы напряжений на элементах ТП по схеме РТК-СТ. Они получены при номинальной нагрузке и отклонениях напряжения в сети на $\pm 5\%$ от номинального уровня и показаны для одной фазы. Здесь цифрами 1, 2 и 3 обозначены фазные напряжения в сети, на входе СТ и на РТК.

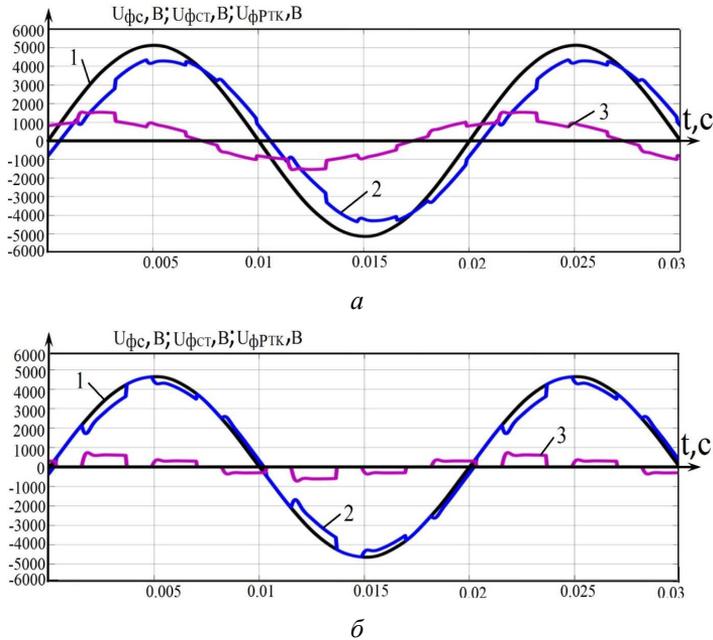
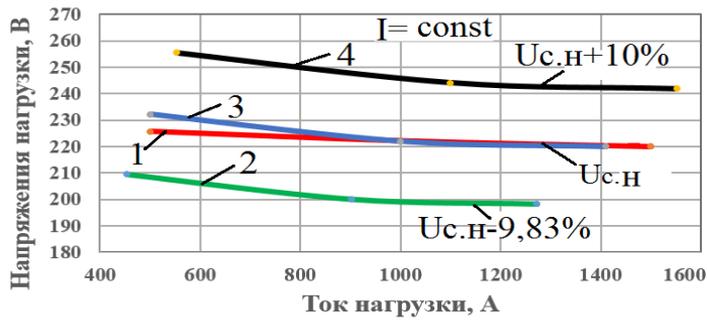


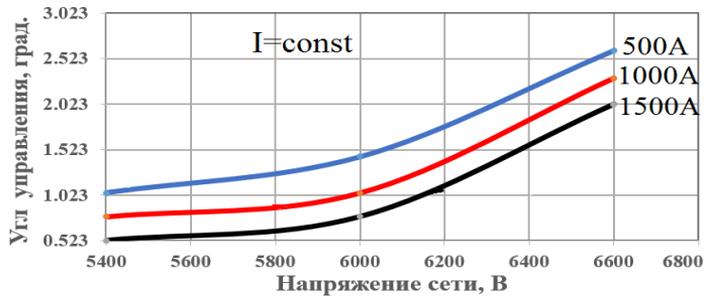
Рис. 5. Осциллограммы фазных напряжений при верхнем (а) и нижнем (б) поддиапазонах регулирования напряжения

В выполненных численных экспериментах (см. рис. 5) рассмотрены фрагменты регулирования напряжения в середине верхнего и нижнего поддиапазонов. Отметим, что при смещении регулирования от середины в ту или другую сторону форма напряжения улучшается и стремится к синусоидальной, как показано на рис. 2.

На рис. 6 приведены характеристики ТП по существующей и новой схемам. Внешние характеристики (см. рис. 6, а) – естественная 1 и искусственные 2–4 получены при фиксированных углах управления. Регулировочная характеристика (см. рис. 6, б) рассчитана при изменении углов управления тиристорами таким образом, чтобы при изменении напряжения в сети с фиксированными токами нагрузки напряжения у потребителей оставалось постоянным. Характеристика стабилизации напряжения на нагрузки (см. рис. 6, в) реализуется в соответствии с регулировочной характеристикой.



а



б



в

Рис. 6. Характеристики трансформаторной подстанции: внешняя (а), регулировочная (б) и стабилизации (в)

Областью применения предлагаемого устройства являются трансформаторные подстанции предприятий всех отраслей промышленности и агропромышленного комплекса мощностью от 0,4 до 2,5 МВ·А с напряжениями 35/(10–6) и (10–6)/0,4 кВ, требующие регулирование напряжения в узком диапазоне $\pm 10\%$.

Выводы. Исследованиями на имитационных моделях динамических и квазистационарных процессов двухподдиапазонного реакторно-

тиристорного регулирующего устройства в составе трансформаторной подстанции установлено следующее:

1. При отклонениях напряжения в сети на $\pm 10\%$ от номинального устройство поддерживается напряжение у потребителей на заданном уровне с точностью не более $\pm 1\%$.

2. Устройство совместно с конденсаторной батареей одновременно со стабилизацией напряжения на выходе трансформаторной подстанции обеспечивает стабилизацию генерируемой реактивной мощности на входе подстанции.

3. В процессе непрерывного регулирования напряжения на входе подстанции под нагрузкой реакторно-тиристорное устройство не создает искажений тока в силовом трансформаторе и в сети.

4. При применении специального управления, учитывающего электромагнитные процессы, устройство производит безударное включение силового трансформатора под нагрузкой без превышения фазными токами их установившихся значений и выключение без возникновения электрической дуги на контактах высоковольтных коммутационных аппаратов.

Библиографический список

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

2. Сергеевков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: трансформаторы / под ред. И.П. Копылова. – М.: Высшая школа, 1989. – 352 с.

3. Климаш В.С. Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием. – Владивосток: Дальнаука, 2002. – 140 с.

4. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

5. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1987. – 832 с.

6. Силовые трансформаторы: справочная книга / под ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

7. Мукосеев Ю.Л. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1973. – 584 с.

8. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 400 с.

9. Федоров А.А., Старкова Л.Е. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

10. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленности предприятий: учебник для вузов по спец. «Электропривод и автоматизация промышленных установок». – М.: Высшая школа, 1969. – 512 с.

11. Федоров А.А., Каменова В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.

12. Кудрин Б.И. Электроснабжение: учебник для студ. учреждений высш. образования. – 4-е изд. – М.: Академия, 2016. – 352 с.

13. 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 // 16th IEEE conference (Florence, Italy, 7–10 June 2016). – Florence, Italy, 2016.

14. Panfilov D.I., Elgebaly A.E. Modified Thyristor Controlled Reactors for Static VAR Compensators // IEEE 6th International Conference on Power and Energy (PECON 2016) (Melaka, Malaysia, November 2016). – Melaka, Malaysia, 2016.

15. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Topologies of thyristor controlled reactor with reduced current harmonic content for static VAR compensators // 17th IEEE conference (Milan, Italy, 6–9 June 2017). – Milan, Italy, 2017.

16. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Design and Optimization of New Thyristors Controlled Reactors with Zero Harmonic Content // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (June 29 – July 3, 2017). – Novosibirsk, 2017.

17. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Thyristors Controlled Reactors for Reactive Power Control with Zero Harmonics Content // 17th IEEE International Conference on Smart Technologies IEEE EUROCON 2017, Ohrid, Macedonia, 6–8 July 2017. – Ohrid, 2017.

18. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Design and evaluation of control system for static VAR compensators with thyristors switched

reactors // IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) (Riga, Latvia, 12–13 October 2017). – Riga, Latvia, 2017.

19. Программный комплекс математических моделей магнитно-тиристорного пускорегулирующего устройства для силового трансформатора в среде MatLab: св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров. – М.: ФИПС, 2017. № 2017613852 от 03 апреля 2017 г.

20. Климаш В.С., Табаров Б.Д. Исследования трансформаторной подстанции с пускорегулирующим устройством в аварийных режимах работы // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Секц. 2: Электроэнергетика, электротехника и автоматизированный электропривод в ТЭК и ЖКХ: материалы III Поволж. науч.-практ. конф. (г. Казань, 7–8 декабря 2017). – Казань, 2017. – С. 118–123.

21. Климаш В.С., Табаров Б.Д. Принципы построения пускорегулирующего устройства для трансформаторных подстанций // Омск. науч. вестник. Сер. Электротехника. – 2017. – № 5(155). – С. 55–60.

22. Табаров Б.Д., Климаш В.С. Разработка способа и устройства отдельного регулирования напряжения трансформаторной подстанции в двух поддиапазонах // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всерос. науч.-техн. конф. студ. и аспирантов (г. Комсомольск-на-Амуре, 9–20 апреля 2018). – Комсомольск-на-Амуре. – 2018. – Т. 2. – С. 455–458.

23. Пат. 2622890 Рос. Федерация, МПК Н 02 М 5/257 (2006.01). Способ включения, выключения и регулирования напряжения трансформаторной подстанции / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров, А.Ю. Гетопанов № 2016131037/07; заявл. 27.07.16; опубл. 21.06.17. Бюл. № 18.

References

1. Venikov V.A., Idel'chik V.I., Liseev M.S. Regulirovanie napriazheniia v elektroenergeticheskikh sistemakh [Voltage regulation in electric power systems]. Moscow: Energoizdat, 1985. 214 p.

2. Sergeenkov B.N., Kiselev V.M., Akimova N.A. Elektricheskie mashiny: transformatory [Electrical machines: transformers]. Ed. I.P. Kopilova. Moscow: Vysshaia shkola, 1989. 352 p.

3. Klimash V.S. Vol'todobavochnye ustroistva dlia kompensatsii otklonenii napriazheniia i reaktivnoi energii s amplitudnym, impul'snym i fazovym regulirovaniem [Volt-additive devices for compensation of voltage and reactive energy deviations with amplitude, pulse and phase control]. Vladivostok: Dal'nauka, 2002. 140 p.

4. Rozhkova L.D., Kozulin V.S. Elektrooborudovanie stantsii i podstantsii [Electrical equipment of stations and substations]. 3rd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 648 p.

5. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machine]. Leningrad: Energiia, 1987. 832 p.

6. Silovye transformatory: spravochnaia kniga [Power transformers. Reference book]. Ed S.D. Lizunova, A.K. Lokhanina. Moscow: Energoizdat, 2004. 616 p.

7. Mukoseev Iu.L. Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriatii [Power supply of industrial enterprises]. Moscow: Energiia, 1973. 584 p.

8. Kniazevskii B.A., Lipkin B.Iu. Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriatii [Power supply of industrial enterprises]. 3rd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 1986. 400 p.

9. Fedorov A.A., Starkova L.E. Uchebnoe posobie dlia kursovogo i diplomnogo proektirovaniia po elektrosnabzheniiu promyshlennykh predpriatii [Textbook for course and diploma design for power supply of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 368 p.

10. Kniazevskii B.A., Lipkin B.Iu. Elektrosnabzhenie promyshlennosti predpriatii: uchebnik dlia vuzov po spetsial'nosti "Elektroprivod i avtomatizatsiia promyshlennykh ustanovok" [Power supply industry enterprises. Textbook for universities on the specialty "Electric Drive and automation of industrial plants"]. Moscow: Vysshaia shkola, 1969. 512 p.

11. Fedorov A.A., Kamenova V.V. Osnovy elektrosnabzheniia promyshlennykh predpriatii: uchebnik dlia vuzov [Basics of power supply of industrial enterprises: textbook for universities]. 4th ed. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 472 p.

12. Kudrin B.I. Elektrosnabzhenie: uchebnik dlia studentov uchrezhdenii vysshego obrazovaniia [Power supply: textbook for the students institutions of higher educations]. 4th ed. Moscow: Akademiia, 2016. 352 p.

13. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashov M.G. Design and Assessment of Static VAR Compensator on Railways Power Grid Operation under Normal and Contingencies Conditions. *16th IEEE conference (Florence, Italy, 7-10 June 2016)*. Florence, Italy, 2016.

14. Panfilov D.I., Elgebaly A.E. Modified Thyristor Controlled Reactors for Static VAR Compensators. *IEEE 6th International Conference on Power and Energy (PECON 2016) (Melaka, Malaysia, November 2016)*. Melaka, Malaysia, 2016.

15. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Topologies of thyristor controlled reactor with reduced current harmonic content for static VAR compensators. *17th IEEE conference (Milan, Italy, 6-9 June 2017)*. Milan, Italy, 2017.

16. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Design and Optimization of New Thyristors Controlled Reactors with Zero Harmonic Content. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (June 29 - July 3, 2017)*. Novosibirsk, 2017.

17. Panfilov D.I., Elgebaly A.E. and Astashev M.G. Thyristors Controlled Reactors for Reactive Power Control with Zero Harmonics Content. *17th IEEE International Conference on Smart Technologies IEEE EUROCON 2017, Ohrid, Macedonia, 6-8 July 2017*. Ohrid, 2017.

18. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Design and evaluation of control system for static VAR compensators with thyristors switched reactors. *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) (Riga, Latvia, 12-13 October 2017)*. Riga, Latvia, 2017.

19. Klimash V.S., Tabarov B.D. Programmnyi kompleks matematicheskikh modelei magnitno-tiristornogo puskoreguliruiushchego ustroystva dlia silovogo transformatora v srede MatLab [Software package of mathematical models of magnetic thyristor starter for power transformer in MatLab]. Moscow: FIPS, 2017, Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2017613852 ot 03 April 2017 goda.

20. Klimash V.S., Tabarov B.D. Issledovaniia transformatornoi podstantsii s puskoreguliruiushchim ustroystvom v avariinykh rezhimakh raboty [Research of transformer substation with start-up control device in emergency operation modes]. *III Povolzhskaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia "Priborostroenie i avtomatizirovannyi elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom khoziaistve. Sektsiia 2: Elektroenergetika, elektrotekhnikai i avtomatizirovannyi elektroprivod v TEK i ZHKKH"* (Kazan', 7-8 December 2017). Kazan', 2017, pp. 118-123.

21. Klimash V.S., Tabarov B.D. Printsipy postroeniia puskoreguliruiushchego ustroystva dlia transformatornykh podstantsii [Principles of con-

struction of a start-up control device for transformer substations]. *Omskii nauchnyi vestnik. Elektrotehnika*, 2017, no. 5(155), pp. 55-60.

22. Tabarov B.D., Klimash V.S. Razrabotka sposoba i ustroistva razdel'nogo regulirovaniia napriazheniia transformatornoi podstantsii v dvukh poddiapazonakh [Development of a method and device for separate voltage regulation of a transformer substation in two sub-bands]. *Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov "Nauchno-tekhnicheskoe tvorchestvo aspirantov i studentov"* (Komsomol'sk-na-Amure, 9-20 April 2018). Komsomol'sk-Na-Amure, 2018, vol. 2, pp. 455-458.

23. Klimash V.S., Tabarov B.D., Getpanov A.Iu. Spособ vkliucheniia, vykliucheniia i regulirovaniia napriazheniia transformatornoi podstantsii [Method of switching on, off and voltage regulation of transformer substation]. *Patent RF No. 2622890 Рос. Федерация*, 2016.

Сведения об авторах

Климаш Владимир Степанович (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Комсомольска-на-Амуре государственного университета (681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, e-mail: klimash@yandex.ru).

Табаров Бехруз Довудходжаевич (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – аспирант кафедры «Промышленная электроника» Комсомольска-на-Амуре государственного университета (681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, e-mail: behruz.tabarov@mail.ru).

About the authors

Klimash Vladimir Stepanovich (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, of the Department of "Industrial electronics" Komsomolsk-on-Amur State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, pr. Lenina, e-mail: klimash@yandex.ru).

Tabarov Bekhruz Dovudkhodzhaevich (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) is a Post-Graduate Student of the Department "Industrial electronics" Komsomolsk-on-Amur State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, pr. Lenina, e-mail: behruz.tabarov@mail.ru).

Получено 08.10.2018