



Принципы построения трансформаторной подстанции на основе управляемого реакторно-тиристорного устройства

Б.Д. Табаров¹✉

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме. Цель – поддержание напряжения в системах электроснабжения на номинальном уровне с высокой эффективностью при нестабильности напряжения в питающей сети или тока на нагрузке. Объектом исследований явилась трансформаторная подстанция с применением предлагаемого управляемого реакторно-тиристорного устройства. Для разработки имитационной модели анализируемой трансформаторной подстанции, проведения исследования и оценки непрерывного регулирования напряжения был использован программный комплекс Matlab. Для достижения поставленной цели в работе разработаны новые принципы построения трансформаторной подстанции, алгоритмы и способы ее управления на основе предлагаемого управляемого реакторно-тиристорного устройства. Показано, что предлагаемое устройство на высокой стороне трансформаторной подстанции необходимо подключать последовательно между сетевым высоковольтным выключателем и первичной обмоткой силового трансформатора. Полученные результаты численных экспериментов подтверждают целесообразность применения предлагаемого устройства и его алгоритмов работы и способы управления в составе трансформаторной подстанции, где существуют проблемы в системах электроснабжения, связанные с поддержанием напряжения на заданном уровне с высокой эффективностью. Приводятся внешние, регулировочные и стабилизационные характеристики, которые иллюстрируют работу существующих систем электроснабжения до и после модернизации при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения из-за внешних и внутренних изменений электрических параметров. Показано, что областью применения предлагаемого устройства являются трансформаторные подстанции систем электроснабжения напряжениями 35/(10-6) кВ и (10-6)/0,4 кВ, где в системах электроснабжения в основном возникает положительное отклонение и колебание напряжения, а также перенапряжения. Таким образом, наиболее целесообразной областью применения устройства являются системы электроснабжения, где возникает необходимость обеспечения многоступенчатого узкодиапазонного регулирования напряжения с высокой эффективностью.

Ключевые слова: питающая сеть, принцип построения трансформаторной подстанции, управляемое реакторно-тиристорное устройство, сетевой высоковольтный выключатель, активно-индуктивная нагрузка, система импульсно-фазового управления, имитационная модель

Для цитирования: Табаров Б.Д. Принципы построения трансформаторной подстанции на основе управляемого реакторно-тиристорного устройства // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 2. С. 252–269. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-252-269>. EDN: BQPAMI.

POWER ENGINEERING

Original article

Design principles of a transformer substation using a thyristor-controlled reactor

Bekhruz D. Tabarov¹✉

¹Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The study aims to ensure the maintenance of nominal voltage levels in power supply systems with high efficiency under conditions of input voltage instability or load current fluctuations. The research focuses on a transformer substation that incorporates a proposed thyristor-controlled reactor. The MATLAB software was employed to develop a simulation model of the analysed transformer substation, to investigate its performance, and to evaluate continuous voltage regulation. Advanced design principles, control algorithms, and operational methods for the transformer substation were developed based on the proposed thyristor-controlled reactor. The study demonstrates that the device should be connected in series on the high-voltage side of the substation, between the circuit breaker and the primary winding of the power transformer. Numerical experiments confirm the feasibility of implementing the proposed device,

along with its control algorithms and operational methods, in transformer substations where power supply systems encounter difficulties in maintaining stable voltage levels with high efficiency. The external, regulating and stabilising characteristics illustrate the performance of existing power supply systems prior to and following modernisation, particularly under overdeviations and overvoltages resulting from external or internal electrical parameter variations. The proposed device can be used in transformer substations for power supply systems with voltages of 35/(10–6) kV and (10–6)/0.4 kV, characterised by overdeviations, fluctuations and overvoltages. Consequently, the optimal application domain for the device is power supply systems requiring multistage, narrow-range voltage regulation with high efficiency.

Keywords: power supply network, build-up principle of a transformer substation, controlled reactor-thyristor device, network high-voltage switch, active-inductive load, pulse-phase control system, simulation model

For citation: Tabarov B.D. Design principles of a transformer substation using a thyristor-controlled reactor. *iPolytech Journal*. 2025;29(2):252-269. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-2-252-269>. EDN: BQPAMI.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение нормальной работы, сохранение срока службы и улучшение эффективности работы электрооборудования при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения являются одним из актуальных вопросов в системах электроснабжения² [1]. Как показывает опыт эксплуатации существующих систем электроснабжения, одной из причин возникновения положительного отклонения напряжения и перенапряжения в системах электроснабжения является повышение напряжения в питающей сети или снижение тока нагрузки на шинах распределительного устройства трансформаторных подстанций³ [2]. В настоящее время для возможности решения данных вопросов с целью увеличения объема выпускаемой продукции, снижения потерь электроэнергии и затрат на приобретение электрооборудования предлагают разные технические решения на основе неуправляемых⁴ [3–8] и управляемых^{5,6} [9–16] традиционных устройств.

Анализ исследования и опыт эксплуатации неуправляемых [3–8] и управляемых [9–16] традиционных устройств подтверждают, что известные устройства позволяют обеспечить нормальную работу и улучшить эффективность работы систем электроснабжения только при повышении напряжения в питающей сети до максимального значения или снижении нагрузки [4, 5, 10, 14] до минимального значения. А в остальных случаях они в целом не только ухудшают эффективность работы систем электроснабжения, но и усугубляют их

работу и сокращают срок службы электрооборудования³ [17, 18]. Учитывая последнее, по мере снижения напряжения в питающей сети или повышения тока нагрузки выводят их из работы, в результате чего в системах электроснабжения возникает необходимость применения дополнительного устройства для поддержания напряжения на заданном уровне. Для устранения вышеуказанных недостатков в работе предлагается рассматривать возможность замены известных традиционных устройств на новое управляемое реакторно-тиристорное устройство (УРТУ) [19]. Предложенное устройство при возникновении положительного отклонения и перенапряжения в системах электроснабжения не только обеспечивает нормальную работу потребителей электроэнергии (предприятия, организации, цеха и др.), но и сохраняет срок службы и повышает их эффективность.

Наиболее целесообразной и эффективной областью применения УРТУ являются трансформаторные подстанции систем электроснабжения, где существует проблемы по обеспечению нормальной работы, сохранению продолжительности работы технологических процессов и срока службы электрооборудования систем электроснабжения с высокой эффективностью.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является поддержание напряжения в системах электроснабжения на номинальном уровне с высокой эффективностью при нестабильности напряжения в питающей сети или тока на нагрузке.

²Радкевич В.Н., Козловская В.Б., Колосова И.В. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособ. Минск: ИВЦ Минфина, 2015. 589 с.

³Волков Н.Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учеб. пособ. Томск: Томский политех. ун-т, 2010. 152 с.

⁴Ананicheва С.С., Алексеев А.А., Мызин А.Л. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учеб. пособ. 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 93 с.

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

1) аналитическое исследование информационных источников по проблеме обеспечения нормальной работы, сохранения срока службы электрооборудования и устранения нарушения технологических процессов при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения в системах электроснабжения;

2) разработка принципов построения трансформаторных подстанций (ТП) на основе нового УРТУ для улучшения эффективности работы систем электроснабжения;

3) разработка алгоритмов и способов управления трансформаторной подстанцией с предлагаемым устройством для стабилизации напряжения с высокой эффективностью при возникновении ступенчатого повышения напряжения в сети до +16% или снижения тока на нагрузке до -70% от номинального значения;

4) разработка имитационной модели существующей и модернизируемой трансформаторной подстанции для проведения исследования, а также оценки непрерывного и точного регулирования напряжения на высокой стороне трансформаторов при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке в пределах вышеуказанных значений тока и напряжения;

5) моделирование системы электроснабжения с существующей и модернизируемой трансформаторной подстанцией для оценки непрерывного и точного регулирования напряжения на высокой стороне ТП при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке в пределах вышеуказанных значений тока и напряжения;

6) построение внешних, регулировочных и стабилизационных характеристик системы электроснабжения до и после модернизации трансформаторной подстанции для оценки функциональных возможностей традиционных и предлагаемого УРТУ при ступенчатом

повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке в пределах вышеуказанных значений тока и напряжения.

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ НОВОГО УПРАВЛЯЕМОГО РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНОГО УСТРОЙСТВА

На рис. 1 в однолинейном исполнении приводится функциональная схема модернизируемой трансформаторной подстанции, которая состоит из питающей сети (G), линии электропередачи (W), разъединителя (QS), блока УРТУ, силового трансформатора (СТ), автоматического выключателя (QF) и блоков датчика отклонения напряжения (ДОН), авторегулирования (БАР) и активно-индуктивной нагрузки (Z). Блок управляемого реакторно-тиристорного устройства состоит из сетевого высоковольтного выключателя (Qc), модулей основных (VS1) и дополнительных (VS2) тиристорных ключей, трехфазного контактора (AC), основного (L1), промежуточного (L2) и дополнительного (L3) реакторов, блока системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и блока синхронизации (БС).

Как видно из рис. 1, блок УРТУ подключен между разъединителем (QS) и первичной обмоткой СТ. Предлагаемое УРТУ последовательно подключено к питающей сети (G) через разъединитель (QS) и непосредственно к СТ. Элементы предлагаемого устройства присоединены к питающей сети (G) и СТ последовательно, а между собой они подключены последовательно-параллельно [19, 20]. Ниже приведено описание подключения элементов заявляемого устройства.

Между разъединителем QS и первичной обмоткой СТ последовательно подключены контактор AC, основной L1, промежуточный L2 и дополнительный L3 реакторы, а последовательно-параллельно к ним подключены модули основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей, где модуль основных тиристорных ключей VS1 параллельно подключен к контактору AC, основному реактору L1

⁵Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах: учебник. М.: Энергоатомиздат, 1985. 214 с.

⁶Климаш В.С. Регулировочные свойства и энергетические коэффициенты тиристорных выпрямителей и регуляторов переменного напряжения: учеб. пособ. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 1998. 88 с.

и модулю дополнительных тиристорных ключей VS2 и последовательно к промежуточному L2 и дополнительному L3 реакторам, а модуль дополнительных тиристорных ключей VS2 параллельно подключен к контактору AC, основному L1 и промежуточному L2 реакторам и последовательно к дополнительному реактору L3. Кроме этого, сетевой высоковольтный выключатель Qc параллельно подключен к контактору AC, основному L1, промежуточному L2 и дополнительному L3 реакторам, а также к модулям основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей. Алгоритмы работы УРТУ определяются изменением величины тока и напряжения, а также характера нагрузки, то есть УРТУ функционирует на основе выходных сигналов блока ДОН.

Стоит также подчеркнуть, что сигналы для изменений проводящих состояний элементов предлагаемого устройства поступают на управляющие входы модулей тиристорных ключей и катушки включения и отключения сетевого высоковольтного выключателя с блока СИФУ, который через блок синхронизации БС синхронизирован к питающей сети G, а на входе блока СИФУ сигналы подаются из блока ДОН через блок авторегулирования БАР.

Предлагаемое УРТУ приступает к работе и вводит силовой трансформатор СТ в работу после замыкания разъединителя QS. Включение и выключение СТ на холостом ходу или под нагрузкой выполняются специальными алгоритмами и способами в зависимости от уровня напряжения питающей сети G или тока активно-индуктивной нагрузки Z_H [21]. Таким образом, УРТУ на высокой стороне трансформаторной подстанции в зависимости от величины (уровня) напряжения питающей сети G или тока активно-индуктивной нагрузки Z_H работает по алгоритму, который иллюстрируется нижеприведенными описаниями [21].

Так, УРТУ регулирует напряжения на высокой стороне СТ при трех уровнях напряжения питающей сети или тока нагрузки: номинальный, промежуточный и максимальный.

Номинальный уровень регулирования напряжения на высокой стороне СТ задается коэффициентом трансформации СТ при включенном сетевом высоковольтном выключателе Qc и полностью выключенных как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключах, а также при выключенном трехфазном контакторе AC, который отключает основной L1, промежуточный L2

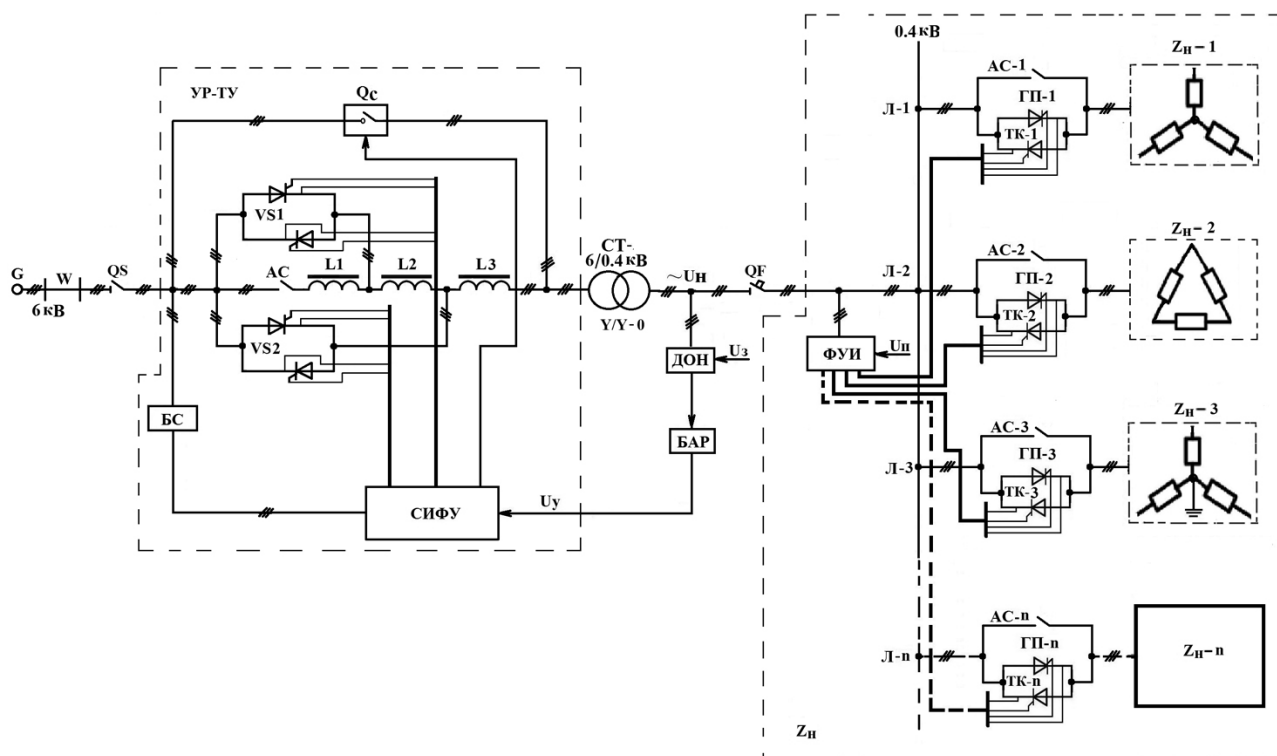


Рис. 1. Функциональная схема модернизируемой системы электроснабжения
Fig. 1. Functional diagram of the upgraded power supply system

и дополнительный L3 реакторы при номинальном уровне напряжения сети G ($U_H = 6$ кВ) и тока нагрузки Z_H ($I_H = 2500$ А). Падение напряжения в УРТУ на этом уровне регулирования напряжения равно нулю.

Промежуточный уровень регулирования напряжения на высокой стороне СТ задается сопротивлением промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при совместной работе основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей при промежуточном уровне напряжения сети G или тока нагрузки Z_H . Трехфазный контактор AC, основной реактор L1 и сетевой высоковольтный выключатель Q_c на этом уровне напряжения сети G или тока нагрузки Z_H шунтированы основными VS1 и дополнительными VS2 тиристорными ключами. Под промежуточным уровнем регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G на +7,5% или снижение тока на нагрузке Z_H на -31,7% от номинального значения. Падение напряжения в УРТУ при стабилизации напряжения в системах электроснабжения на этом уровне регулирования напряжения можно определить по формуле (1):

$$\Delta U_{\text{пром.}} = \sum \Delta U_{L2,3} = \frac{2}{5} \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В} \quad (1)$$

где ΔU_{L2} – падение напряжения в промежуточном реакторе, В; ΔU_{L3} – падение напряжения в дополнительном реакторе, В.

Как видно из выражения (1), дополнительный реактор L3 на этом уровне регулирования напряжения полностью находится в работе, а промежуточный реактор L2 шунтирован дополнительными тиристорными ключами VS2 на $\frac{2}{5} \Delta U_{L2}$, что позволяет поддерживать номинальное значение напряжения в системах электроснабжения (СЭС) на заданном уровне.

Максимальный уровень регулирования напряжения на высокой стороне СТ задается суммарным сопротивлением основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при включенном трехфазном контакторе AC и выключенном сетевом высоковольтном выключателе Q_c , а также полностью закрытых как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключах при максимальном уровне напряжения сети G и номинальном токе нагрузки Z_H или снижением тока нагрузки Z_H до максималь-

ного значения. Под максимальным уровнем регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G на +16% и номинальной нагрузки Z_H или снижение тока на нагрузке Z_H на -71,2% от номинального значения. Падение напряжения в УРТУ при максимальном уровне регулирования напряжения можно определить по выражению (2):

$$\Delta U_{\text{макс.}} = \sum \Delta U_{L1,2,3} = \Delta U_{L1} + \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В} \quad (2)$$

где $\sum \Delta U_{L1,2,3}$ – сумма падения напряжения в основном ΔU_{L1} , промежуточном ΔU_{L2} и дополнительном ΔU_{L3} реакторах, соответственно, В.

Ввиду этого УРТУ также позволяет регулировать напряжения на высокой стороне СТ между номинальным и максимальным уровнями регулирования напряжения относительно промежуточного уровня, который можно разделить на минимально-промежуточный и максимально-промежуточный уровни регулирования напряжения.

Минимально-промежуточный уровень регулирования напряжения на высокой стороне силового трансформатора СТ задается сопротивлением промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при совместной работе основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей при минимально-промежуточном уровне напряжения сети G или тока нагрузки Z_H . Трехфазный контактор AC, основной реактор L1 и сетевой высоковольтный выключатель Q_c на этом уровне напряжения питающей сети G или тока нагрузки Z_H шунтированы основными VS1 и дополнительными VS2 тиристорными ключами. Под минимально-промежуточным уровнем регулирования напряжения понимается повышение напряжения питающей сети G в пределах 0–7,5% или снижение тока нагрузки Z_H в пределах 0–31,7% от номинального уровня (значения). Здесь падение напряжения в УРТУ можно определить по формулам (5) и (6). Стоит подчеркнуть, что на этом уровне регулирования напряжения индуктивное сопротивление промежуточного реактора L2 регулируется дополнительными тиристорными ключами VS2 (см. рис. 5 б) от нуля до $\frac{2}{5} \Delta U_{L2}$, что позволяет поддерживать номинальное значение напряжения в СЭС на заданном уровне.

Максимально-промежуточный уровень регулирования напряжения на высокой стороне силового трансформатора СТ задается сопротивлением основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов основными VS1 и дополнительными VS2 тиристорными ключами при включенном трехфазном контакторе АС при максимально-промежуточном уровне напряжения сети G или тока нагрузки Z_H , а сетевой высоковольтный выключатель Q_c на этом уровне регулирования напряжения выключен. Под максимально-промежуточным уровнем регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G в пределах 7,5–16% или снижение тока на нагрузке Z_H в пределах от 31,7 до 71,2% относительно номинального уровня. Выражениями (7) и (8) можно определить падение напряжения в УРТУ при максимально-промежуточном уровне регулирования напряжения. На этом уровне регулирования напряжения индуктивное сопротивление основного реактора L1 регулируется основными тиристорными ключами VS1 в пределах от нуля до $\frac{2}{5}\Delta U_{L1}$, а индуктивное сопротивление промежуточного реактора L2 регулируется дополнительными тиристорными ключами VS2 в пределах 0,4...0,8 ΔU_{L2} , которые позволяют поддерживать номинальное значение напряжения в СЭС на заданном уровне.

Кроме этого, предлагаемое УРТУ предусматривает также разделение минимально-промежуточного и максимально-промежуточного уровней регулирования напряжения на два диапазона: нижний и верхний.

Под нижним диапазоном минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G от номинального значения до +2,5% или снижение тока на нагрузке Z_H от номинального значения до 11,4%. А под верхним диапазоном регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G в пределах от +2,5 до +7,5% (промежуточного уровня напряжения сети) или снижение тока на нагрузке Z_H в пределах от -11,4 до -31,7% (промежуточного уровня тока нагрузки) относительно номинального уровня.

Стабилизация напряжения в системах электроснабжения при нижнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регули-

рования напряжения достигается при помощи дополнительного реактора L3 и дополнительных тиристорных ключей VS2 при полностью выключенных трехфазном контакторе АС, сетевом высоковольтном выключателе Q_c , основном L1 и промежуточном L2 реакторах, а также полностью закрытых основных тиристорных ключей VS1, а поддержание напряжения в системах электроснабжения на номинальном уровне при верхнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения осуществляется при помощи промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов, основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей при выключенных трехфазном контакторе АС, и сетевом высоковольтном выключателе Q_c .

Падение напряжения в предложенном устройстве при нижнем (3) и верхнем (4) диапазонах минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения можно определить на основании выражений (1) и (2).

Формулой (3) можно определить падение напряжения при нижнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения:

$$\Delta U_{\text{ниж.д.мин-пр.}} = \Delta U_{L3}, \text{ В.} \quad (3)$$

Падение напряжения при верхнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения можно описать формулой (4):

$$\Delta U_{\text{верх.д.мин-пр.}} = (0 \dots \frac{2}{5})\Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В.} \quad (4)$$

Как отмечалось выше, индуктивное сопротивление промежуточного реактора L2 в этом диапазоне регулирования напряжения регулируется дополнительными тиристорными ключами VS2 (см. рис. 5 б) от (0...0,4) ΔU_{L2} .

Предлагаемое устройство при нижнем и верхнем диапазонах максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения поддерживает напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне по ниже представленным алгоритмам.

Под нижним диапазоном максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G от +7,5 до +12,5% или снижение тока на нагрузке Z_H от -31,7 до -51,6%. А под верхним диапазоном регулиро-

вания напряжения понимается повышение напряжения в питающей сети G в пределах от 12,5 до +16% (максимального уровня напряжения сети) или снижение тока на нагрузке Z_n в пределах от -51,6 до -71,2% (снижение тока нагрузки до максимального значения) относительно номинального уровня.

Обеспечение номинального напряжения в системах электроснабжения при нижнем диапазоне максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения выполняется за счет расшунтирования промежуточного $L2$ и дополнительного $L3$ реакторов основными $VS1$ и дополнительными $VS2$ тиристорными ключами при выключенных трехфазном контакторе AC и сетевом высоковольтном выключателе Q_c . А стабилизация напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне при верхнем диапазоне максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения достигается при помощи трехфазного контактора AC и основных тиристорных ключей $VS1$, а также основного $L1$, промежуточного $L2$ и дополнительного $L3$ реакторов при полностью закрытых дополнительных тиристорных ключей $VS2$ и выключенном сетевом высоковольтном выключателе Q_c .

Падение напряжения в предложенном устройстве при нижнем (5) и верхнем (6) диапазонах максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения можно определить на основании выражений (1)–(4) следующим образом:

– нижний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{ниж.д. макс-пр.}} = (0,4 \dots 0,8) \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В.} \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что индуктивное сопротивление промежуточного реактора $L2$ в этом диапазоне регулирования напряжения регулируется дополнительными тиристорными ключами $VS2$ (см. рис. 5 б) в пределах $(0,4 \dots 0,8) \Delta U_{L2}$.

– верхний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{верх.д. макс-пр.}} = \frac{1}{2} \Delta U_{L1} + \Delta U_{L2} + \Delta U_{L3}, \text{ В.} \quad (6)$$

В этом диапазоне регулирования напряжения индуктивное сопротивление основно-

го реактора $L1$ регулируется основными тиристорными ключами $VS1$ от нуля до $\frac{1}{2} \Delta U_{L1}$, которое позволяет поддерживать номинальное значение напряжения в СЭС на заданном уровне.

Учитывая выражения (1)–(6) ниже приведены математические описания, которые иллюстрируют создание падения напряжения в подстанции при пяти уровнях напряжения питающей сети или тока нагрузки и двух разделенных диапазонах между этими уровнями.

– падение напряжения в подстанции при номинальном уровне напряжения

$$\Delta U_{\text{ном.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (7)$$

где $\Delta U_{\text{ЛЭП}}$ – потери напряжения в линии электропередачи (ЛЭП), В; $\Delta U_{\text{СТ}}$ – потерь напряжения в трансформаторе, В.

$$\text{Отсюда } \Delta U_{\text{ЛЭП}} = \frac{(P \cdot r_0 + Q \cdot x_0) \cdot L}{U_{\text{ном}}}, \text{ В} \quad (8)$$

$$\Delta U_{\text{СТ}} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_{\text{ном}}}, \text{ В} \quad (9)$$

где P и Q – активная и реактивная мощности линии электропередачи и трансформатора соответственно, кВт·А и кВар; r_0 и x_0 – удельное активное и реактивное сопротивление линии электропередачи, Ом/км; L – длина линии электропередачи, км; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжения линии электропередачи и трансформатора соответственно, кВ; R и X – активное и реактивное сопротивление трансформатора, Ом.

Активное и реактивное сопротивление трансформатора определяют по выражению (10) и (11) соответственно:

$$R = \left(\frac{U_{\text{н.СТ}}}{S_n} \right)^2 \cdot \Delta P_{\text{КЗ}}, \text{ Ом} \quad (10)$$

$$X = \frac{U_{\text{н.СТ}}^2}{S_n} \cdot \frac{U_{\text{КЗ}}}{100}, \text{ Ом} \quad (11)$$

где $\Delta P_{\text{КЗ}}$ – активная мощность КЗ трансформатора, кВт; $U_{\text{КЗ}}$ – напряжение КЗ трансформатора, %; S_n – полная номинальная мощность трансформатора, кВт·А;

– падение напряжения в подстанции при промежуточном уровне регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{пром.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{пром.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (12)$$

– падение напряжения в подстанции при максимальном уровне регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{макс.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{макс.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В.} \quad (13)$$

Определяем математическое описание падения напряжения в подстанции при нижних (14, 16) и верхних (15, 17) диапазонах минимально-промежуточного и максимально-промежуточного уровней регулирования напряжения:

– падение напряжения в подстанции при нижнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{ниж.д.мин-пр.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{ниж.д.мин-пр.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (14)$$

– падение напряжения в подстанции при верхнем диапазоне минимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{верх.д.мин-пр.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{верх.д.мин-пр.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (15)$$

– падение напряжения в подстанции при нижнем диапазоне максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{ниж.д.макс-пр.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{ниж.д.макс-пр.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В} \quad (16)$$

– падение напряжения в подстанции при верхнем диапазоне максимально-промежуточного уровня регулирования напряжения

$$\Delta U_{\text{верх.д.макс-пр.п}} = \Delta U_{\text{ЛЭП}} + \Delta U_{\text{верх.д.макс-пр.}} + \Delta U_{\text{СТ}}, \text{ В.} \quad (17)$$

Стоит особо подчеркнуть, что формулы (1)–(17) задействованы при регулировании напряжения в СЭС по заданному значению действующего напряжения объекта по низкой стороне силового трансформатора, где его значение равно $U_3 = 220 \text{ В}$.

Регулирование напряжения с помощью УРТУ выполняется непрерывно во всех уровнях и диапазонах регулирования с хорошими энергетическими показателями.

При стабилизации напряжения между уровнями и диапазонами регулирования напряжения введена зона нечувствительности на изменение проводящего состояния как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключей, при которой отклонение напряжения в системах электроснабжения не превышает 1 вольт (В) как вверх, так и вниз от степени регулирования напряжения того или иного уровня и диапазона.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МОДЕРНИЗИРУЕМОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Для проведения исследования и оценки непрерывного и точного регулирования напряжения на высокой стороне трансформаторной подстанции при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети и снижении тока на нагрузке в среде Matlab⁷ была разработана имитационная модель модернизируемой трансформаторной подстанции, которая представлена на рис. 2. Она состоит из блока питающей сети (ПС), ЛЭП, блоков разъединителя (QS), контактора AC и сетевого высоковольтного выключателя (Q1), модулей основных (VS1) и дополнительных (VS2) тиристорных ключей, блоков системы импульсно-фазового управления (СИФУ-1 и СИФУ-2), основного (L1), промежуточного (L2) и дополнительного (L3) реакторов, СТ, активно-индуктивных нагрузок ($Z_{н-1} - Z_{н-8}$), блоков ДОН, авторегулирования БАР, выключателя нагрузки ($Q_{н-1}$), гибридных пускателей (ГП-1 – ГП-8) активно-индуктивных нагрузок и формирователя управляющих импульсов (ФУИ) тиристорных пускателей блоков ГП-1 – ГП-8.

Стоит подчеркнуть, что функционирование предлагаемого УРТУ зависит от величин входящего и выходящего напряжения блока ДОН, где с правой стороны блока в качестве задающего сигнала выступает действующее значение напряжения (U_3), которое равно 220 В. При изменении электрических пара-

⁷Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023685892, Российская Федерация. Программный комплекс имитационной модели двухтрансформаторной подстанции с одним общим двухподдиапазонным реакторно-тиристорным управляемым регулятором напряжения / Б.Д. Табаров; правообладатель ФГБОУ ВО «КНАГУ». Дата поступления 22.11.2023; дата гос. регистрации в реестре 30.11.2023. Бюл. № 12.

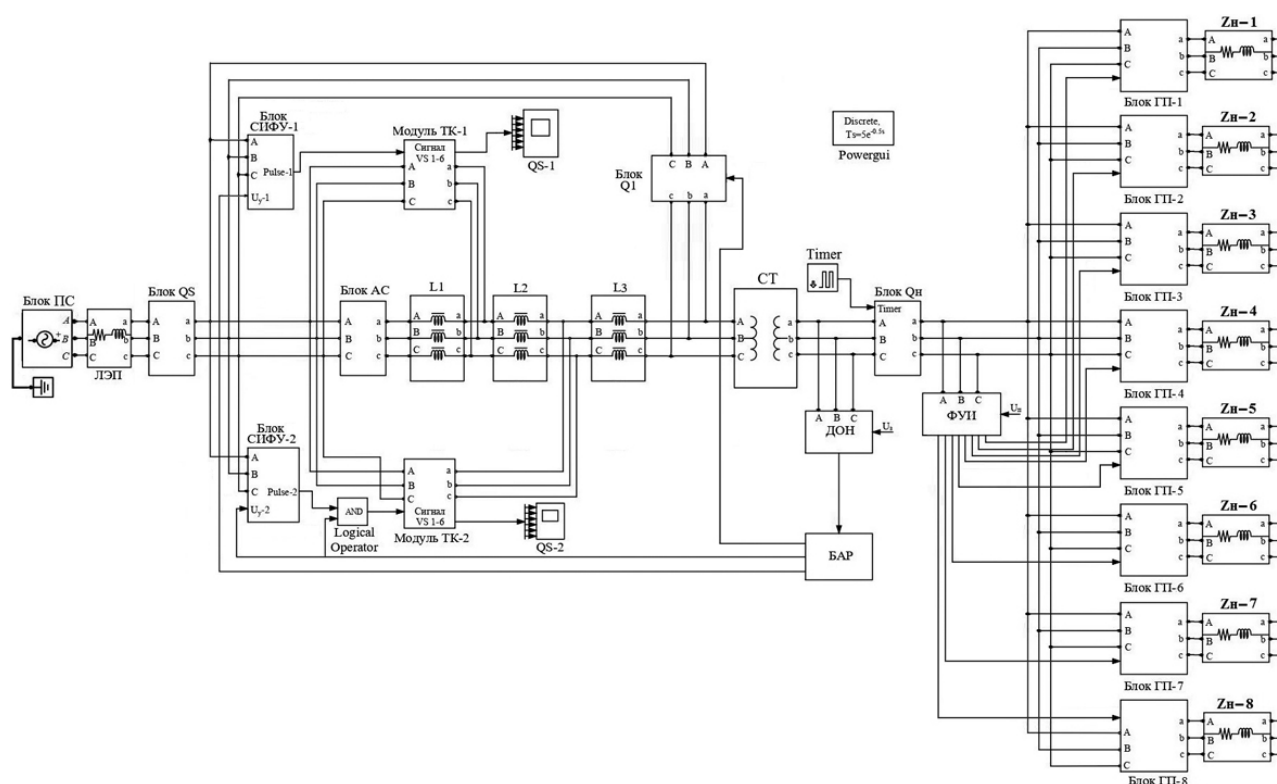


Рис. 2. Блочно-модульная модель модернизируемой трансформаторной подстанции
Fig. 2. Block-modular model of an upgraded transformer substation

метров (напряжение питающей сети и ток нагрузки) с блока ДОН поступают сигналы на вход блока БАР, в результате чего блок БАР (учитывая величины отклонения и колебания напряжения) подает сигналы на соответствующие блоки СИФУ-1 и СИФУ-2 модулей основных и дополнительных тиристорных ключей. Блоки СИФУ-1 и СИФУ-2 формируют импульсы и подают их на соответствующие управляющие входы модулей тиристорных ключей для изменения проводящего состояния тиристорных ключей. Блок ФУИ в целом предназначен для облегчения включения и выключения нагрузки с высокими энергетическими показателями.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ МОДЕРНИЗИРУЕМОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ ПРИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ НАПЯЖЕНИЯ И ТОКА

Исследование поддержания напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения проводилось на модели модернизируемой трансформаторной подстанции мощностью 1000 кВ·А и напряжением 6/0,4 кВ при угле

сдвига фаз тока активно-индуктивной нагрузки равно $\varphi = 45^\circ$. Полученные результаты исследования приводятся на осциллограммах рис. 3 и 4 для фазы «А». На осциллограммах рис. 3 приводятся мгновенные значения токов и напряжений питающей сети (i_c и u_c) и нагрузки (i_n и u_n), а также мгновенное значение напряжения первичной обмотки силового трансформатора (u_{CT}) и действующие значения напряжения на нагрузке (U_n). А на рис. 4 приводятся действующие значения токов и напряжений питающей сети (I_c и U_c) и нагрузки (I_n и U_n), а также напряжения первичной обмотки силового трансформатора (U_{CT}) при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16% или снижении тока на нагрузке до -71,2% от номинального уровня. Работу силового трансформатора и потребителей электроэнергии при номинальном напряжении питающей сети и токе нагрузки на нижеприведенных рис. 3 и 4 иллюстрирует интервал времени T-1, а интервалами времени T-2, T-3, T-4, T-5, T-6, T-7, T-8 иллюстрируются ступенчатые повышения напряжения в питающей сети или снижения тока на нагрузке.

Ниже рассматриваем полученные результаты исследования стабилизации напря-

жения в системах электроснабжения на заданном уровне при помощи предлагаемого УРТУ при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке.

Осциллограммы, представленные на рис. 3, иллюстрируют работу модернизируемой трансформаторной подстанции при номинальном напряжении питающей сети и нагрузке (рис. 3 а, интервал времени Т-1) и при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети до +16% и номинальной нагрузке (рис. 3 а), а также при номинальном напряжении питающей сети и ступенчатом снижении тока на нагрузке до -71,2% (рис. 3 б).

Стоит подчеркнуть, что напряжение в питающей сети на каждом интервале времени (Т-2, Т-3, Т-4, Т-5, Т-6, Т-7) повышается на +2,5% (рис. 3 а), а нагрузка на этих интервалах времени снижается примерно на -10,1% (рис. 3 б) от номинального значения. Как отмечалось выше, силовой трансформатор СТ на интервале времени Т-1 работает, соответственно, с номинальными параметрами и обеспечивает потребителями электроэнергии номинальное напряжение с высокими энергетическими показателями (номинальный уровень регулирования). На этом интервале времени напряжение прикладывается на входе СТ через сетевой высоковольтный выключатель Q_c и задается коэффициентом трансформации силового трансформатора СТ при полностью выключенных как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключах, а также контактора АС, основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов.

Падение напряжения в СЭС на этом уровне напряжения питающей сети и тока нагрузки определяется по формуле (7). В конце интервала времени Т-1 и начале интервала времени Т-2 в системах электроснабжения возникает внезапное повышение напряжения в питающей сети на +2,5% (рис. 3 а) или снижение тока на нагрузке на -11,4% (рис. 3 б) от номинального значения (нижний диапазон минимально-промежуточного уровня регулирования).

На этом интервале времени (Т-2) из блока СИФУ-2 подаются сигналы на включение модуля дополнительных тиристорных ключей VS2 для включения в работе дополнительно реактора L3 и одновременно с этим пода-

ется команда на катушку отключения сетевого высоковольтного выключателя Q_c для его выключения, в результате чего модуль дополнительных тиристорных ключей VS2 в начале интервала времени Т-2 при угле $\alpha = 15^\circ$ полностью включается, и вводится в работу дополнительный реактор L3, параллельно с этим отключается сетевой высоковольтный выключатель Q_c , и, таким образом, напряжение в системах электроснабжения стабилизируется на заданном уровне.

Модуль дополнительных тиристорных ключей VS2 на этом интервале времени полностью шунтирует модуль основных тиристорных ключей VS1, контактора АС, основного L1 и промежуточного L2 реакторов. Падение напряжения в подстанции в этом диапазоне регулирования напряжения определяется по выражению (14). Интервал времени Т-3 иллюстрирует работу модернизируемой трансформаторной подстанции при внезапном повышении напряжения в питающей сети на +5% (рис. 3 а) или снижении тока на нагрузке на 21,5% (рис. 3 б) от номинального значения (верхний диапазон минимально-промежуточного уровня регулирования).

Здесь для поддержания напряжения в системах электроснабжения на номинальном значении из блока СИФУ-1 подаются сигналы на включение модуля основных тиристорных ключей VS1 для включения в работу промежуточного реактора L2 и параллельно с этим из блока СИФУ-2 подаются сигналы на управляемый вход модуля дополнительных тиристорных ключей VS2 для частичного его шунтирования (увеличения его угла управления), в результате чего модулем основных тиристорных ключей VS1 вводится в работу промежуточный реактор L2 при угле управления $\alpha = 15^\circ$, и одновременно с этим увеличивается угол проводящего состояния модуля дополнительных тиристорных ключей VS2 до $\alpha = 75^\circ$ для рис. 3 а и до $\alpha = 59^\circ$ для рис. 3 б.

На этом интервале времени (Т-3), благодаря созданию падения напряжения на индуктивных сопротивлениях промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов соответствующими тиристорными ключами, напряжение в системах электроснабжения не меняется и остается стабильным. Сетевой высоковольтный выключатель Q_c , контактор АС и основной реактор L1 на этом

уровне напряжения питающей сети и тока нагрузки выключены. В данном интервале времени падение напряжения в СЭС можно определить по формуле (15). В конце интервала времени Т-3 и начале интервала времени Т-4 внезапно напряжение на входе СТ повышается на +7,5% (рис. 3 а) или ток на нагрузке снижается на -31,7% (рис. 3 б) от номинального значения и создает необходимость сохранения напряжения на выходе СТ на заданном уровне (промежуточный уровень регулирования). Поддержание напряжения в системах электроснабжения на номинальном уровне на этом интервале времени достигается за счет расшунтирования модуля основных тиристорных ключей VS1, который осуществляется модулем дополнительных тиристорных ключей VS2 при увеличении его проводящего состояния до $\alpha = 88^\circ$ для рис. 3 а и до $\alpha = 67^\circ$ для рис. 3 б, в результате чего напряжение в системах электроснабжения остается по-прежнему неизменным.

На этом интервале времени сетевой высоковольтный выключатель Q_c, контактор АС и основной реактор L1 находятся в отключенном состоянии. По выражению (12) можно определить падение напряжения в подстанции в этом диапазоне регулирования напряжения. Интервал времени Т-5 иллюстрирует работу модернизируемой трансформаторной подстанции при внезапном повышении напряжения в питающей сети на +10% (рис. 3 а) или снижении тока на нагрузке на -41,7% (рис. 3 б) от номинального уровня (нижний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования). Здесь сохранение выходного напряжения СТ на номинальном значении достигается при помощи модулей основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей, а также промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при выключенных сетевом высоковольтном выключателе Q_c, контакторе АС и основном реакторе L1. Модуль дополнительных тиристорных ключей VS2 на этом интервале времени расшунтирует модуль основных тиристорных ключей VS1 при угле управления $\alpha = 99^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 77^\circ$ для рис. 3 б.

Формулой (16) можно определить падение напряжения в СЭС при неустойчивости напряжения в питающей сети и тока на на-

грузке, которой иллюстрируется интервалом времени Т-5. В конце интервала времени Т-5 и начале интервала времени Т-6 внезапно напряжение на входе СТ повышается на +12,5% (рис. 3 а) или ток на нагрузке снижается на -51,6% (рис. 3 б) от заданного значения, который создает необходимость поддержать напряжение в системах электроснабжения на номинальном значении (верхний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования).

Поддержание номинального напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне на этом интервале времени выполняется при помощи модулей основных VS1 и дополнительных VS2 тиристорных ключей, а также промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при выключенных сетевом высоковольтном выключателе Q_c, контакторе АС и основном реакторе L1.

Дополнительные тиристорные ключи VS2 на этом уровне напряжения питающей сети и тока нагрузки расшунтируют основные тиристорные ключи VS1 при угле управления $\alpha = 117^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 89^\circ$ для рис. 3 б и поддерживают номинальное напряжение в системах электроснабжения с высокими энергетическими показателями. На этом интервале времени (Т-6) падение напряжения в СЭС можно определить по формуле (17). Интервал времени Т-7 иллюстрирует работу модернизируемой трансформаторной подстанции при повышении напряжения в питающей сети на +15% (рис. 3 а) или снижении тока на нагрузке на -61,5% (рис. 3 б) от номинального значения (верхний диапазон максимально-промежуточного уровня регулирования).

На этом интервале времени поддержание напряжения на шинах распределительного устройства СТ на заданном значении осуществляется при помощи модуля основных тиристорных ключей VS1, основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при включенном контакторе АС и полностью выключенных сетевом высоковольтном выключателе Q_c и модуле дополнительных тиристорных ключей VS2.

Здесь в конце интервала времени Т-6 и начале интервала времени Т-7 из блока СИФУ-2 подаются импульсы на управляющие входы модуля дополнительных тиристорных ключей VS2 для полного его выключе-

ния, параллельно с этим подается команда на включение контактора АС. Дополнительные тиристорные ключи VS2 на данном интервале времени выключаются при угле $\alpha = 145^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 135^\circ$ для рис. 3 б. Угол проводящего состояния модуля основных тиристорных ключей VS1 при этом уровне составляет $\alpha = 85^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 75^\circ$ для рис. 3 б. Модуль основных тиристорных ключей VS1 на этом интервале времени, частично шунтируя контактор АС и основной реактор L1, поддерживает номинальное напряжение в системах электроснабжения на заданном значении. Падение напряжения в подстанции на этом интервале времени (Т-7) определяется выражением (17).

В конце интервала времени Т-7 и начале интервала времени Т-8 внезапно напряжение на входе СТ повышается на +16% (рис. 3 а) или ток на нагрузке снижается на -71,2% (рис. 3 б) от номинального значения и создает необходимость поддерживать напряжение в системах электроснабжения на заданном уровне (максимальный уровень регулирования напряжения). Обеспечение номинального напряжения в системах электроснабжения на этом интервале времени достигается при помощи контактора АС, основного L1, промежуточного L2 и дополнительного L3 реакторов при полностью закрытых как основных VS1, так и дополнительных VS2 тиристорных ключей. Основные тиристорные ключи VS1 в начале интервала времени Т-8 полностью расшунтируют контактор АС и основной реактор L1 при угле $\alpha = 120^\circ$ для рис. 3 а и $\alpha = 130^\circ$ для рис. 3 б. Выражением (13) можно рассчитать падение напряжения в СЭС при максимальном уровне регулирования напряжения.

Таким образом, несмотря на нестабильность напряжения в питающей сети или тока на нагрузке, предлагаемое УРТУ поддерживает напряжение в системах электроснабжения на номинальном значении с высокими энергетическими показателями.

Для более широкой интерпретации полученных результатов исследования, которые представлены на рис. 3, и описание, приведенное к ним на рис. 4, приводятся действующие значения токов и напряжений питающей сети (I_c и U_c) и нагрузки (I_n и U_n), а также действующее значение напряжения (U_c) первичной обмотки СТ при ступенчатом

повышении напряжения питающей сети или снижении тока нагрузки.

Как иллюстрируют эти осциллограммы, напряжение в питающей сети повышается (рис. 4 а, кривая U_{nc}), а ток на нагрузке снижается (рис. 4 б, кривая I_n), в результате чего предлагаемое УРТУ, благодаря созданию просадки напряжения на реакторах, не позволяет повышаться напряжению не только у потребителей, но и в силовом трансформаторе (рис. 4 а, кривая U_{CT} и U_n). А при снижении тока нагрузки также благодаря расширению функциональных возможностей предлагаемого УРТУ не создается положительное отклонение напряжения и перенапряжение не только на нагрузке (рис. 4 б, кривая U_n), но и в силовом трансформаторе и питающей сети (рис. 4 б, кривая U_{CT} и U_{nc}) и поддерживается напряжение у потребителей на номинальном уровне с высокими энергетическими показателями.

Полученные результаты исследования, приведенные на рис. 4, подтверждают комплексное улучшение работы электротехнических систем при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения.

Анализ полученных результатов исследования позволяет сделать вывод, что применение предлагаемого УРТУ на высокой стороне трансформаторной подстанции может не только облегчить и обеспечить нормальную работу, но и повысить эффективность работы систем электроснабжения.

Работоспособность предлагаемого УРТУ при ступенчатом повышении напряжения питающей сети и снижении тока нагрузки иллюстрируют внешние, стабилизационные и регулировочные характеристики, которые представлены на рис. 5, где с левой стороны приводятся характеристики, которые построены с учетом повышения напряжения в питающей сети, а с правой стороны – с учетом снижения тока на нагрузке.

Стабилизационные и регулировочные характеристики построены при работе модуля дополнительных тиристорных ключей VS2. Регулировочные характеристики построены для систем электроснабжения с известным (кривая 1) и предлагаемым (кривая 2) устройствами. Важно отметить, что внешние характеристики (рис. 5 а) построены при фиксированных углах управления тиристорных ключей и ступенчатом повышении напряже-

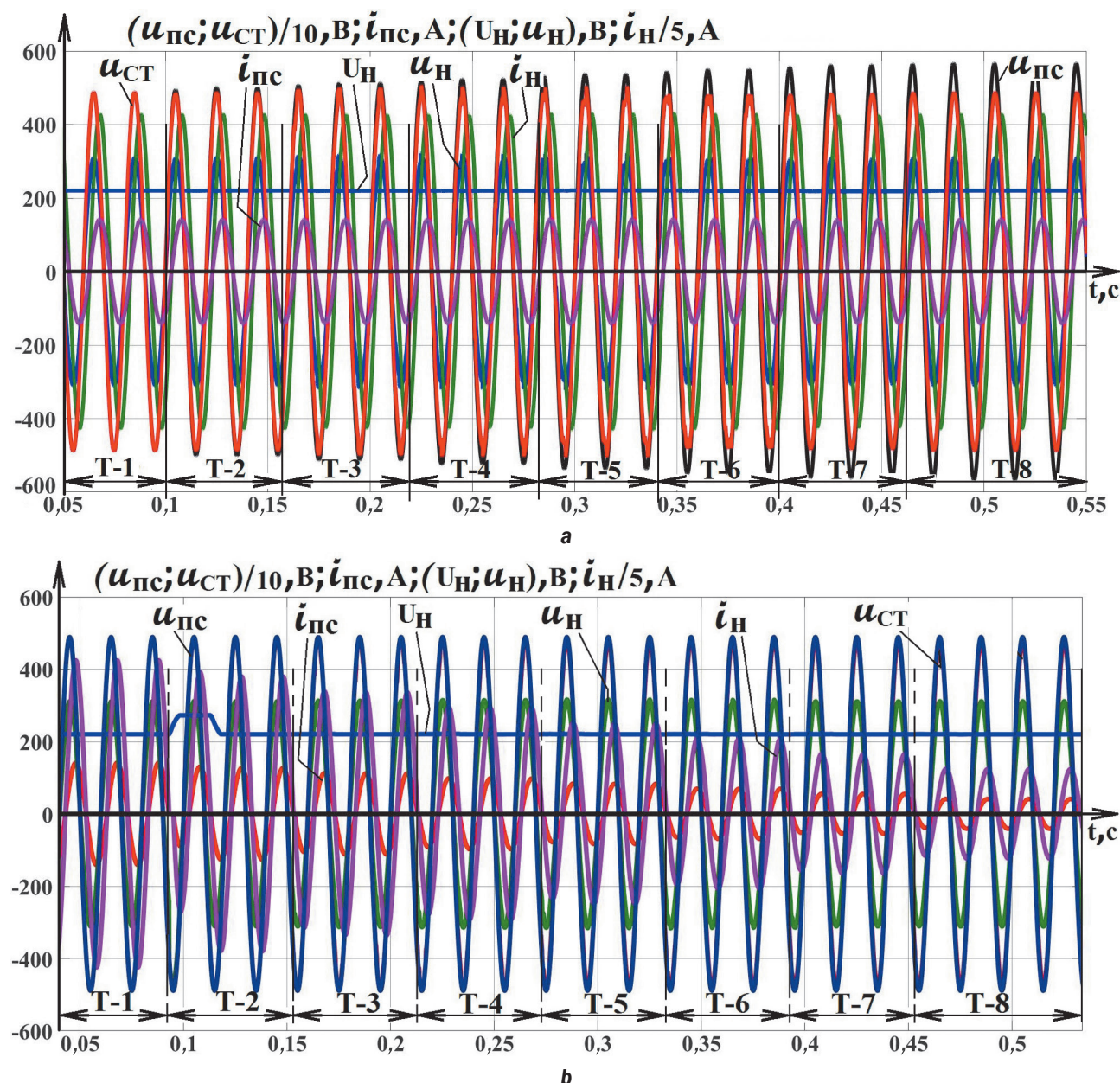


Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений при ступенчатом повышении напряжения питающей сети или снижении тока нагрузки

Fig. 3. Waveforms of currents and voltages during a stepwise increase in the supply network voltage or a decrease in the load current

ния в питающей сети или снижении тока на нагрузке, а регулировочные характеристики рассчитаны при изменении углов управления дополнительных тиристорных ключей VS2 таким образом, чтобы при ступенчатом повышении напряжения в питающей сети или снижении тока на нагрузке напряжение в системах электроснабжения оставалось постоянным (рис. 5 б). Характеристики стабилизации напряжения на нагрузке (рис. 5 с) построены с учетом регулировочных характеристик.

Как видно из стабилизационной характеристики (см. рис. 5 с, кривая 2), предлагаемое УРТУ обладает преимуществами по сравнению с традиционными регуляторами напряжения (см. рис. 5 с, кривая 1), в частности по регулирующим и стабилизационным свойствам. Дополнительные тиристорные ключи при ступенчатом повышении напряжения питающей сети стабилизируют напряжение в системах электроснабжения на номинальном значении при изменении углов управления в диапазонах от $\alpha = 15^\circ$ до

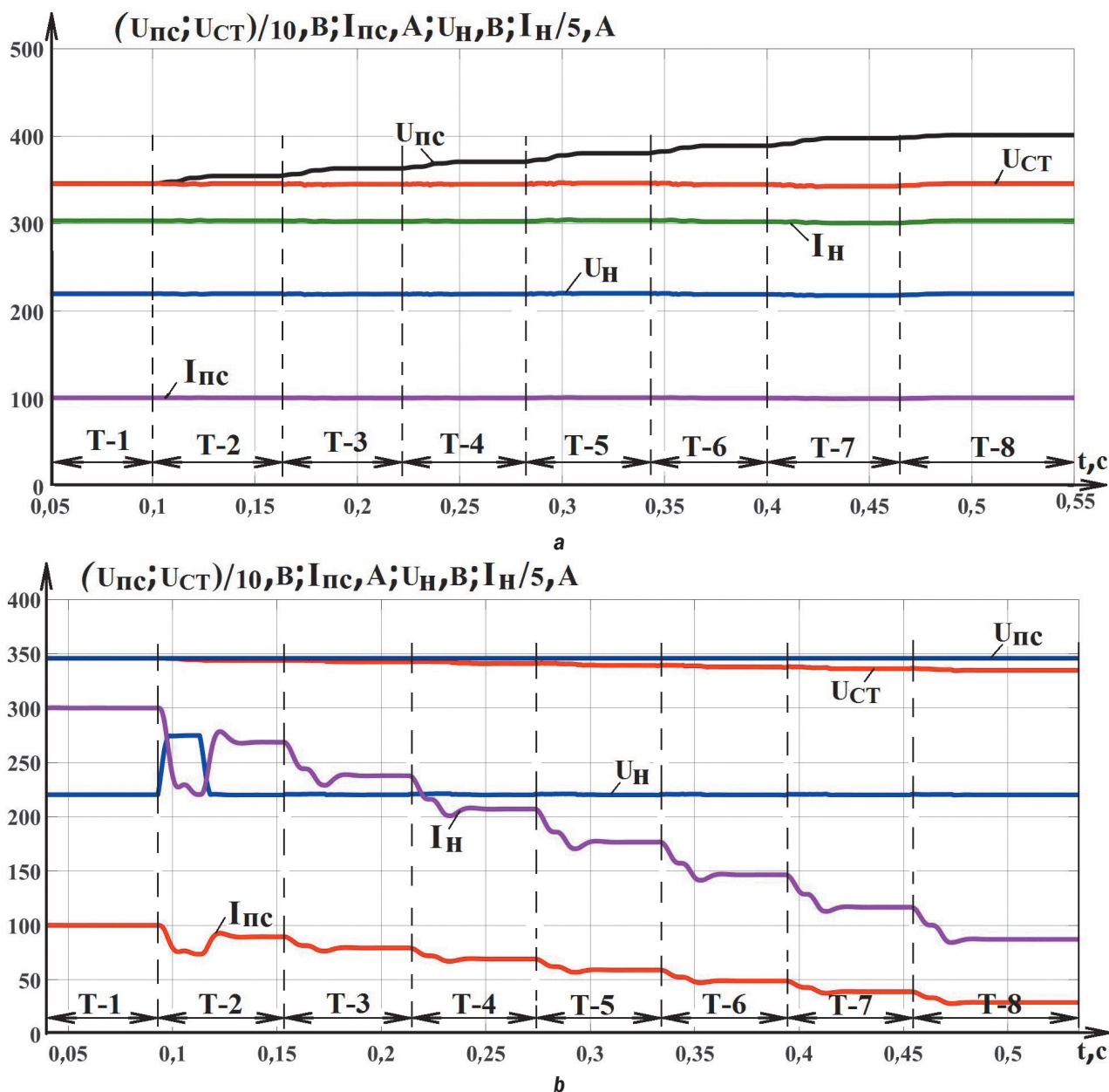


Рис. 4. Осциллограммы действующих значений токов и напряжений при ступенчатом повышении напряжения питающей сети или снижении тока нагрузки

Fig. 4. Waveforms of effective values of currents and voltages during a stepwise increase in the supply network voltage or a decrease in the load current

$\alpha = 145^\circ$ (см. рис. 5 б, с левой стороны), а при снижении тока нагрузки будут поддерживать номинальное напряжение в системах электроснабжения в диапазонах от $\alpha = 15^\circ$ до $\alpha = 135^\circ$ (см. рис. 5 б, с правой стороны). Стоит особо отметить, что изменение углов управления тиристорных ключей предлагаемого УРТУ зависит от повышения величины напряжения питающей сети или снижения величины тока нагрузки, а также от характера и угла сдвига активно-индуктивной нагрузки.

Необходимо отметить, что для большего расширения функциональных возможностей, предлагаемого УРТУ с целью сохранения высоких значений эффективности электроустановки, необходимо учитывать увеличение величины напряжения питающей сети или снижение величины тока нагрузки исследуемого объекта. Учитывая последнее, можно для каждого объекта индивидуально разработать предлагаемое УРТУ с определенным индуктивным сопротивлением реакторов и оптимальным способом управления.

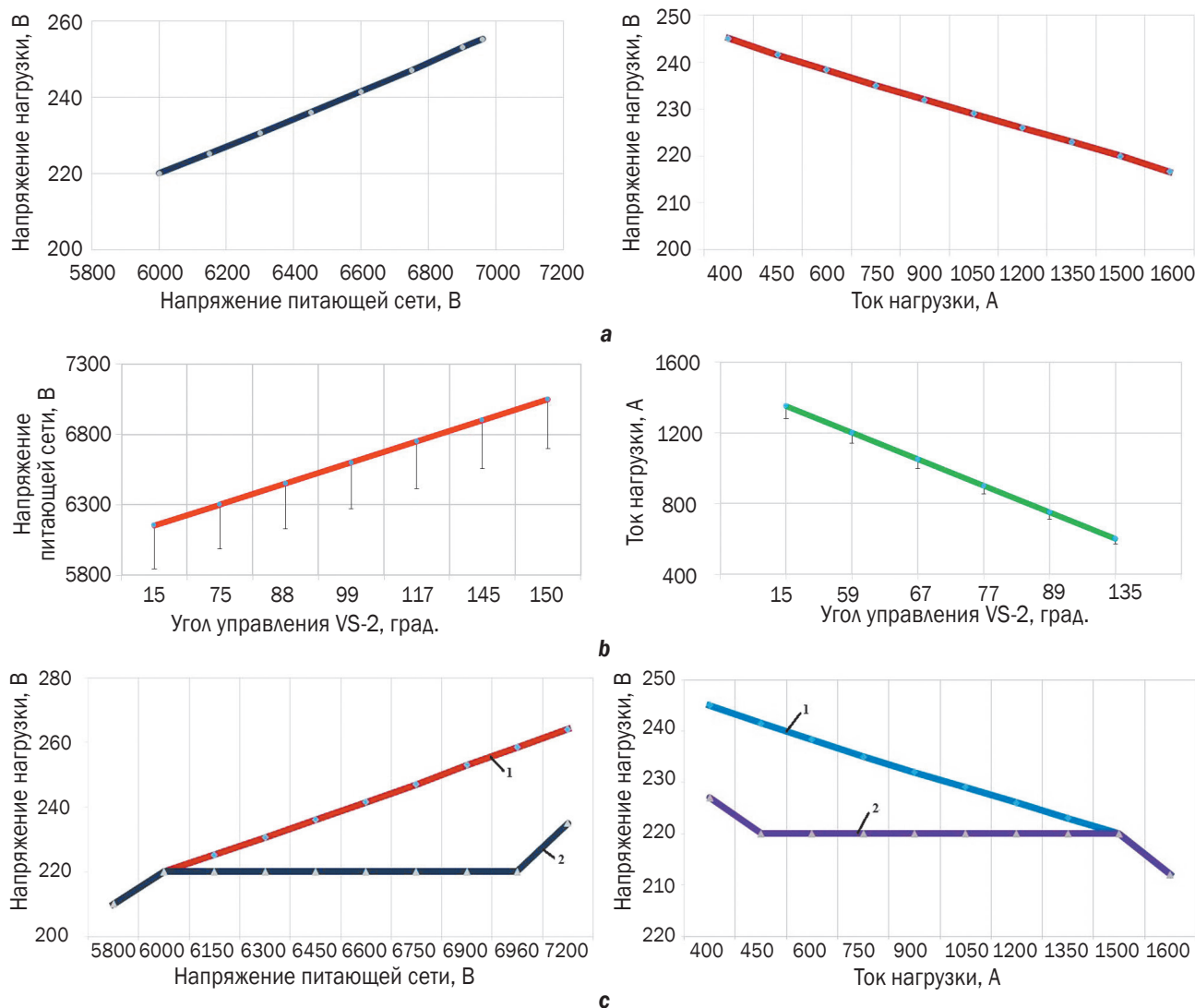


Рис. 5. Характеристики существующей и модернизируемой трансформаторной подстанции при ступенчатом повышении напряжения питающей сети или снижении тока нагрузки

Fig. 5. Characteristics of an existing and upgraded transformer substation with a stepwise increase in supply network voltage or a decrease in load current

Важно отметить, что предлагаемое устройство также имеет возможности поддерживать напряжение в системах электроснабжения на номинальном уровне в случае одновременного возникновения положительного отклонения (колебания) напряжения в питающей сети и отрицательного отклонения (колебания) тока на нагрузке с высокими энергетическими показателями.

Стоит также отметить, что по результатам анализа данной работы в дальнейшем будут проводиться исследования энергетических показателей систем электроснабжения с применением предлагаемого УРТУ, результаты которых позволят более глубоко оценить эффективность использования предложенного технического решения на высокой сто-

роне трансформаторной подстанции в качестве пускорегулирующего устройства.

Областью применения предлагаемого устройства являются трансформаторные подстанции систем электроснабжения мощностью до 63000 кВ·А, с напряжениями 35/(10-6) кВ и мощностью до 1600 кВ·А, с напряжениями (10-6)/0,4 кВ, где необходимо обеспечить регулирование напряжения на высокой стороне силового трансформатора в узком диапазоне от номинального уровня до +16%.

Наиболее целесообразной областью применения предлагаемого устройства являются системы электроснабжения, требующие многоступенчатого узкоподдиапазонного регулирования напряжения с высокой эффективностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования и анализ известных научных работ и опыта эксплуатации существующих электротехнических систем по обеспечению нормальной работы и сохранению срока службы электрооборудования систем электроснабжения при возникновении положительного отклонения напряжения и перенапряжения показали, что возникновение положительного отклонения напряжения и перенапряжения в лучшем случае приводит к предотвращению технологических процессов, в результате которых снижается объем выпускаемой продукции. Кроме этого, также ухудшается эффективность работы систем электроснабжения.

2. Предложено новое техническое решение на основе управляемого реакторно-тиристорного устройства на высокой стороне трансформаторной подстанции для поддержания напряжения в СЭС на заданном уровне при нестабильности напряжения в питающей сети или тока на нагрузке.

3. Предложены новые алгоритмы и способы непрерывного и точного регулирования напряжения на высокой стороне трансформаторной подстанции с управляемым реакторно-тиристорным устройством, позволяющие обеспечить нормальную работу систем электроснабжения.

4. Результатами исследования стабилизации напряжения в СЭС с предлагаемым устройством установлено, что применение предлагаемого технического решения на высокой стороне трансформаторной подстанции, несмотря на ступенчатые повышения напряжения в питающей сети и снижения тока на нагрузке, позволяет поддерживать напряжения исследуемого объекта на номинальном уровне с высокой эффективностью.

5. Интегральными характеристиками показано, что управляемое реакторно-тиристорное устройство (по сравнению с традиционными устройствами) обладает высокой эксплуатационной характеристикой и простотой конструкции при регулировании напряжения в широких пределах, диапазонах и поддиапазонах.

Список источников

1. Фетисов Л.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. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>. EDN: YXRTWH.
2. Lumberras D., Gálvez E., Collado A., Zaragoza J. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 21. P. 5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>.
3. Дурсалиев М.Д., Бахышев И.М., Валькевич Н.И., Валькевич А.Н. Опыт эксплуатации шунтирующих реакторов 500 кВ в Кыргызской Республике // Энергетик. 2009. № 10. С. 18–20.
4. Al-Saedi W., Lachowicz S.W., Habibi D., Bass O. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using particle swarm optimization // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 42. Iss. 1. P. 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.007>.
5. Montoya F.G., Banos R., Gil C., Espin A., Alcayde A., Gomez J. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2010. Vol. 23. Iss. 5. P. 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.011>.
6. Наумов А.А. Обеспечение требуемого качества электрической энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 85–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>. EDN: MTRTJG.
7. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 7. P. 1051. <https://doi.org/10.3390/en14071951>.
8. Исмоилов С.Т. Распределенное регулирование режима напряжения электрической сети // Политехнический Вестник. Серия: Техника и общество. 2014. Т. 25. № 1. С. 59–63.
9. Смирнов С.С., Осак А.Б. Управляемый подмагничиванием трансформатор как эффективное средство регулирования напряжения в сети // Вестник ИргТУ. 2016. № 6. С. 146–155. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-146-155>.
10. Fishov A.G., Klavsuts D.A., Klavsuts I.L. Multi-agent regulation of voltage in Smart Grid system with the use of distributed generation and customers // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 698. P. 761–767. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.761>.
11. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I., Bolshev V. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks // International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2019. Vol. 20. Iss. 3. P. 2018–0269. <https://doi.org/10.1515/ijeeps2018-0269>.
12. Chernyshov M., Dovgun V., Temerbaev S., Shakurova Z. Hybrid power quality conditioner for three-phase four-wire power systems // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 178. P. 01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801009>.

13. Klavsuts D.A., Klavsuts I.L., Levinzon S.V. New method for regulating voltage an AC current // 46th International Universities' Power Engineering Conference (Soest, 5–8 September 2011). Soest: VDE, 2011. P. 3–5.
14. Xiao Hongxia, Zhu Chunfeng, Liu Fahui. Research of power quality management technology according to distribution network involving electric arc furnace // 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. 2012. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2012.8>.
15. Макашева С.И. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление: монография. Хабаровск: ДВГУПС, 2020. 114 с.
16. Patent no. 7816894, United States of America, B2. Method and apparatus for regulating voltage / L.Z. Feigin, S.V. Levinson, D.A. Klavsuts. Publ. 19.10.2010.
17. Ma Jian, Jun Zhang, Xiao Luxin, Chen Kexu, Wu Jianhua. Classification of power quality disturbances via deep learning // IETE. Technical Review. 2017. Vol. 34. Iss. 4. P. 408–415. <https://doi.org/10.1080/02564602.2016.1196620>.
18. Климаш В.С., Константинов А.М. Устройство для повышения качества напряжения и энергетических показателей трансформаторных подстанций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 9. С. 570–581. EDN: LTKRSG.
19. Пат. № 2829330, Российская Федерация, С1, H02M, 5/25. Реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство на высокой стороне трансформаторной подстанции / патентообладатель Б.Д. Табаров. Заявл. 24.05.2024; опубл. 30.10.2024.
20. Табаров Б.Д., Соловьев В.А., Сериков А.В. Исследование возможности стабилизации напряжения питания промышленных потребителей при изменениях параметров нагрузки // Известия вузов. Электромеханика. 2024. Т. 67. № 1. С. 115–123. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2024-1-115-123>.
21. Пат. № 2834452, Российская Федерация, С1. Способ управления реакторно-тиристорным пускорегулирующим устройством силового трансформатора / патентообладатель Б.Д. Табаров. Заявл. 19.07.2024; опубл. 11.02.2025.

References

1. Fetisov L.V., Rozhencova N.V., Bulatov O.A. Improving the quality of electric power in low voltage networks. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):99-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>. EDN: YXRTWH.
2. Lumbreras D., Gálvez E., Collado A., Zaragoza J. Trends in power quality, harmonic mitigation and standards for light and heavy industries: a review. *Energies*. 2020;13(21):5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>.
3. Durusaliev M.D., Bakhyshev I.M., Valkevich N.I., Valkevich A.N. Operating experience of 500 kV shunt reactors in the Kyrgyz Republic. *Power and electrical engineering*. 2009;10:18-20. (In Russ.).
4. Al-Saedi W., Lachowicz S.W., Habibi D., Bass O. Power quality enhancement in autonomous microgrid operation using particle swarm optimization. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2012;42(1):139-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.007>.
5. Montoya F.G., Banos R., Gil C., Espin A., Alcayde A., Gomez J. Minimization of voltage deviation and power losses in power networks using Pareto optimization methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2010;23(5):695-703. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.01.011>.
6. Naumov A.A. The required quality of electrical energy provision. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):85-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-85-92>. EDN: MTRTJG.
7. Popescu M., Bitoleanu A., Linca M. Improving power quality by a four-wire shunt active power filter: a case study. *Energies*. 2021;14(7):1051. <https://doi.org/10.3390/en14071951>.
8. Ismailov S.T. Distributed regulation of voltage regime in electrical network. *Polytechnical Bulletin. Technique and Society*. 2014;25(1):59-63. (In Russ.).
9. Smirnov S. S., Osak A.B. Controlled magnetic biased transformer as an effective tool of supply voltage regulation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;6:146-155. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-146-155>.
10. Fishov A.G., Klavsuts D.A., Klavsuts I.L. Multi-agent regulation of voltage in Smart Grid system with the use of distributed generation and customers. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;698:761-767. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.698.761>.
11. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I., Bolshev V. Adaptive automatic voltage regulation in rural 0.38 kV electrical networks. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*. 2019;20(3):2018-0269. <https://doi.org/10.1515/ijeeps2018-0269>.
12. Chernyshov M., Dovgun V., Temerbaev S., Shakurova Z. Hybrid power quality conditioner for three-phase four-wire power systems. In: *E3S Web of Conferences*. 2020;178:01009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801009>.
13. Klavsuts D.A., Klavsuts I.L., Levinzon S.V. New method for regulating voltage an AC current. In: *46th International Universities' Power Engineering Conference*. 5–8 September 2011, Soest. Soest: VDE; 2011, p. 3-5.
14. Xiao Hongxia, Zhu Chunfeng, Liu Fahui. Research of power quality management technology according to distribution network involving electric arc furnace. In: *4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. 2012. <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2012.8>.

15. Makasheva S.I. *Electric energy quality: monitoring, forecast, control*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2020, 114 p. (In Russ.).
16. Feigin L.Z., Levinson S.V., Klavsuts D.A. *Method and apparatus for regulating voltage*. Patent US, no. 7816894; 2010.
17. Ma Jian, Jun Zhang, Xiao Luxin, Chen Kexu, Wu Jianhua. Classification of power quality disturbances via deep learning. *IETE. Technical Review*. 2017;34(4):408-415. <https://doi.org/10.1080/02564602.2016.1196620>.
18. Klimash V.S., Konstantinov A.M. Device for increasing voltage quality and energy indicators of transformer substations. *Proceedings of the Tula State University*. 2019;9:570-581. (In Russ.). EDN: LTKRSG.
19. Tabarov B.D. *Reactor-thyristor start-up control device on the high side of a transformer substation*. Patent RF, no. 2829330; 2024. (In Russ.).
20. Tabarov B.D., Solovyev V.A., Serikov A.V. Studying the possibility of stabilizing power supply voltage of industrial consumers under changed load parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*. 2024;67(1):115-123. (In Russ.). <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2024-1-115-123>.
21. Tabarov B.D. *A method to control a reactor-thyristor start-up control device of a power transformer*. Patent RF, no. 2834452; 2025. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Табаров Бехруз Довудходжаевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Электропривод и
автоматизация промышленных установок»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
ул. Ленина, 27, Россия
✉ behruz.tabarov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5878-3755>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bekhruz D. Tabarov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Electric Drive and Automation
of Industrial installations,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia
✉ behruz.tabarov@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5878-3755>

Заявленный вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Author's contribution

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.02.2025 г.; одобрена после рецензирования 31.03.2025 г.; принята к публикации 06.05.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 06.02.2025; approved after reviewing 31.03.2025; accepted for publication 06.05.2025.