

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.314

EDN: MMQUKA

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-3-475-488



Исследование влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения системы электроснабжения

Б.Д. Табаров¹✉¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме. Цель – оценка влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках системы электроснабжения при плавном (дискретном) регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора. При разработке блочно-модульной модели трансформаторной подстанции с предлагаемым управляемым регулятором напряжения и измерительными модулями использовалась программа MatLab. На данной разработанной блочно-модульной модели трансформаторной подстанции проводилось исследование несинусоидальности тока и напряжения на разных участках системы электроснабжения при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне. Исследование осуществлялось в цеховом трансформаторе мощностью 1 МВА и напряжением 6/0,4 кВ при активно-индуктивном характере нагрузки с углом фазового сдвига тока нагрузки $\varphi=45$ град. Полученные результаты исследования несинусоидальности тока и напряжения на разных участках системы электроснабжения подтверждают, что, благодаря расширению функциональных возможностей предлагаемого технического решения, напряжение у потребителей сохраняется на заданном уровне с высокими технико-экономическими показателями. Показано, что предлагаемое устройство при снижении напряжения сети на 5% и повышении тока активно-индуктивной нагрузки на 35% создает несинусоидальность напряжения, величина которой не превышает допустимые нормы, установленные отечественным и международным стандартами. При этом предлагаемое устройство сохраняет напряжение у потребителей на заданном уровне. Из полученной интегральной характеристики стабилизации напряжения видно, что применение предлагаемого технического решения взамен существующего механического регулятора напряжения типа «переключение без возбуждения» позволяет сохранить номинальное напряжение на шине распределительного устройства. В рамках данной работы в дальнейшем планируется проводить исследование стабилизации напряжения у потребителей с одновременной компенсацией реактивной мощности для комплексного улучшения технико-экономических показателей систем электроснабжения при нестабильности напряжения питающей сети и тока нагрузки.

Ключевые слова: питающая сеть, цеховой трансформатор, двухподдиапазонный реакторно-тиристорный управляемый регулятор напряжения, коэффициент несинусоидальности напряжения, коэффициент искажения синусоидальности тока, активно-индуктивная нагрузка, система электроснабжения

Для цитирования: Табаров Б.Д. Исследование влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения системы электроснабжения // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 475–488. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-475-488>. EDN: MMQUKA.

POWER ENGINEERING

Original article

Influence of a new controlled voltage regulator on the current and voltage non-sinusoidality of a power supply system

Bekhruz D. Tabarov¹✉¹Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. This work evaluates the influence of a new controlled voltage regulator on the current and voltage non-sinusoidality in different sections of a power supply system during smooth (discrete) voltage regulation on the high-voltage side of a shop transformer. The MatLab software application was used to develop a block-modular model for a transformer substation with the proposed controlled voltage regulator and measurement modules. The developed model was used to investigate the current and voltage non-sinusoidality in different parts of a power

supply system when stabilizing the voltage at the consumer end at a given level. The study was carried out using a shop transformer with a capacity of 1 MVA and a voltage of 6/0.4 kV under an active-inductive character of the load with the load current phase angle of $\varphi=45$ deg. The obtained results confirm that, due to the extended functional capabilities of the proposed technical solution, the voltage at consumers is maintained at a given level under high technical and economic performance. When the network voltage is reduced by 5% and the active-inductive load current is increased by 35%, the proposed device was shown to create voltage non-sinusoidality. The voltage non-sinusoidality value does not exceed the permissible domestic and international norms. In addition, the proposed device is capable of maintaining the voltage at the consumer end at a given level. The obtained integral characteristic of voltage stabilization shows that the application of the proposed technical solution instead of the existing mechanical voltage regulator of the "switching without excitation" type allows the nominal voltage at the busbar of the switchgear to be retained. Further research will investigate voltage stabilization at consumers with simultaneous compensation of reactive power for complex improvement of technical and economic indicators of power supply systems under the conditions of unstable supply voltage and load current.

Keywords: power supply network, shop transformer, double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator, voltage non-sinusoidal coefficient, current total harmonic distortion coefficient, active inductive load, power supply system

For citation: Tabarov B.D. Influence of a new controlled voltage regulator on the current and voltage non-sinusoidality of a power supply system. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):475-488. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-475-488>. EDN: MMQUKA.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день улучшение качества электроэнергии является одним из актуальных вопросов во всех отраслях систем электроснабжения, в частности на промпредприятиях и агропромышленных комплексах, и согласуется с Энергетической Стратегией России на период до 2035 года и рядом отраслевых программ².

Опыт эксплуатации трансформаторных подстанций напряжением (6, 10)/0,4 кВ показывает, что в настоящее время в системах электроснабжения (СЭС) низкого и среднего класса напряжения не рассматривается вопрос стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне. Как известно, изменения напряжения в питающей сети и (или) тока на нагрузке создают отклонения и колебания напряжения у потребителей, значения которых в большинстве случаев превышают предельно допустимые нормы, установленные ГОСТами^{3,4}. Стоит также отметить, что, как показывает практика, не всегда в СЭС (6, 10)/0,4 кВ рассматривается защита электроустановки от перенапряжения, в результате чего в лучшем случае это приводит к нарушению технологического процесса и сокращению срока службы электрооборудования.

Вопросом сохранения напряжения у потребителей на заданном уровне достаточно

глубоко занимались как отечественные^{5,6} [1–6], так и зарубежные [7–20] ученые, среди публикаций которых можно отметить работы [1, 7, 9]. В этих работах ученые, учитывая возникновение положительного и отрицательного отклонения напряжения у потребителей, на основе базовых элементов разработали разные технические решения и способы управления ими для поддержания напряжения в системах электроснабжения на заданном уровне. Положительная сторона этих технических решений заключается в сохранении напряжения у потребителей на номинальном уровне, несмотря на нестабильности напряжения в сети и (или) тока на нагрузке. Известные устройства [1, 7, 9] помимо преимуществ также имеют и недостатки, основными из которых являются наличие несинусоидальности напряжения, создаваемое устройством, сложное устройство, а также низкие технико-экономические показатели.

В целом аналитический обзор информационных источников, посвященных вопросам поддержания напряжения у потребителей на заданном уровне без создания несинусоидальности напряжения, показал, что применение энергосберегающих установок, переход на цифровые устройства, появление новых потребителей электроэнергии, низкое

²Распоряжение Правительства РФ от 09 июня 2020 г. № 1523-р «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года». Режим доступа: <http://government.ru/docs/39847/> (дата обращения: 16.03.2024).

³ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Росстандарт, 2014.

⁴AC Sources for IEC 1000. Harmonics and Flicker Testing (Международный стандарт МЭК 1000) Режим доступа: <https://shop.standards.govt.nz/catalog> (дата обращения: 17.03.2024).

быстродействие регуляторов напряжения и сравнительно невысокая точность регулирования напряжения ухудшают качество электроэнергии, что приводит к сокращению срока службы электрооборудования и значительному снижению технико-экономических показателей систем электроснабжения [14, 15]. Учитывая недостатки существующих СЭС и результаты аналитических обзоров информационных источников, посвященных вопросам повышения качества электроэнергии, предлагается применение нового регулятора напряжения типа двухподдиапазонного реакторно-тиристорного управляемого регулятора напряжения (ДР-ТУРН) [16], который, несмотря на снижение напряжения в сети и повышение тока на нагрузке, позволяет сохранить напряжение у потребителей на номинальном уровне и комплексно улучшить технико-экономические показатели системы электроснабжения. Областью применения, предлагаемого ДР-ТУРН, являются трансформаторные подстанции всех отраслей систем электроснабжения низкого и среднего класса напряжения.

Ниже, используя метод имитационного моделирования, в среде MatLab проводятся исследования влияния устройства ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при нестабильности напряжения питающей сети и тока активно-индуктивной нагрузки.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является оценка влияния нового автоматизированного регулятора напряжения типа ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения СЭС при стабилизации напряжения у потребителей на заданном (номинальном) уровне.

Для достижения поставленной цели решались нижеприведенные задачи:

1) разработать функциональную схему трансформаторной подстанции с предлагаемым двухподдиапазонным реакторно-тиристорным управляемым регулятором напряжения для обеспечения нормальной работы, улучшения показателей качества электроэ-

нергии и технико-экономических показателей всех отраслей системы электроснабжения при стационарных и динамических процессах;

2) разработать блочно-модульную модель трансформаторной подстанции СЭС с предлагаемым ДР-ТУРН и измерительными модулями для проведения исследования и оценки влияния ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при плавном регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора;

3) на основе полученных осциллограмм мгновенных значений токов и напряжений, приведенных в работе [17], построить характеристику стабилизации напряжения у потребителей с устройством ДР-ТУРН при разных уровнях напряжения питающей сети и тока активно-индуктивной нагрузки;

4) исследовать и оценить влияние ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне.

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ С ПРЕДЛАГАЕМЫМ ДВУХПОДДИАПАЗОННЫМ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНЫМ УПРАВЛЯЕМЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПЯЖЕНИЯ

Аналитическое исследование информационных источников и опыта эксплуатации трансформаторных подстанций, связанное с обеспечением нормальной работы, сохранением срока службы электрооборудования, улучшением качества электроэнергии и технико-экономических показателей всех отраслей СЭС при стационарных и динамических процессах, позволило выявить недостатки широко распространенных технических решений и способов управления, которые разработаны на основе механических и электронных компонентов как совместно (гибридный), так и отдельно. Это позволило разработать новый принцип построения трансформаторных подстанций на основе

⁵Волков Н.Г. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: учеб. пособ. Томск: Томский политехнический ун-т, 2010. 152 с.

⁶Решения для повышения качества электроснабжения в сетях 0,4 кВ. Акционерное общество высоковольтного оборудования «Электроаппарат». Режим доступа: https://enertek63.ru/wp-content/uploads/2021/03/jea_buster.pdf (дата обращения: 16.03.2024 г.).

двух модулей тиристорных ключей, трехфазного контактора и двух реакторов с разными индуктивными сопротивлениями. Принципу действия предлагаемого технического решения и его специализированному способу управления в широкой интерпретации посвящена работа [16].

На рис. 1 в однолинейном исполнении показана функциональная схема цехового трансформатора подстанции с новым устройством, которая представляет собой трехфазную сеть (G), линию электропередачи (W), трехфазный сетевой высоковольтный выключатель (Qc), блок ДР-ТУРН, цеховой трансформатор (ЦТ), блоки датчика отклонения напряжения (ДОН) и авторегулирования (БАР), трехфазный автоматический выключатель (QF) и блок активно-индуктивной нагрузки (Z).

На рис. 1 блок регулятора (ДР-ТУРН), блок нагрузки (Z_H) с гибридными пускателями и их системы формирователя управляющих им-

пульсов (ФУИ) выделены пунктиром и представлены в виде силовой управляющей составляющей.

БЛОЧНО-МОДУЛЬНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ С НОВЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ МОДУЛЯМИ

Автором статьи в среде MatLab была построена блочно-модульная имитационная модель трансформаторной подстанции⁷, на которой проводились исследования стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне при внезапном снижении напряжения в сети и повышении тока активно-индуктивной нагрузки [17]. Для проведения исследования влияния ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения СЭС при стабилизации напряжения у потребителей

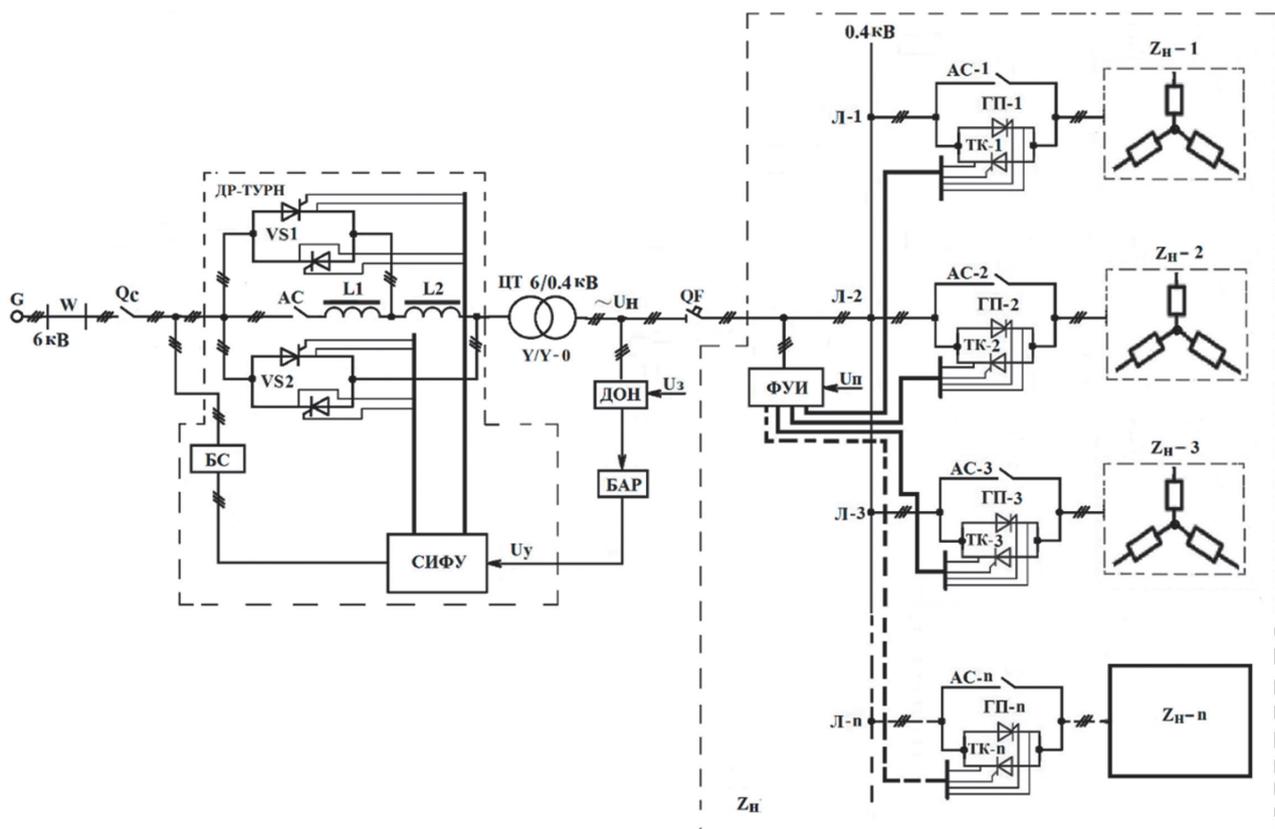


Рис. 1. Функциональная схема трансформаторной подстанции с предлагаемым двухподдиапазонным реакторно-тиристорным управляемым регулятором напряжения

Fig. 1. Functional diagram of a transformer substation with the proposed double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator

⁷А.с. № 2022611670, Российская Федерация. Блочнo-модульная модель двухтрансформаторной подстанции с двухподдиапазонным реакторно-тиристорным устройством / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров. Заявл. 24.01.2022; опубли. 31.01.2022. Бюл. № 2.

на заданном уровне построена имитационная модель трансформаторной подстанции с предлагаемым регулятором напряжения и измерительными модулями.

Под измерительными модулями понимаются модули для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока. Измерительные модули разработаны на основе известных математических выражений⁸ и представлены в развернутом виде в работе [18]. Исследование коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках системы электроснабжения проводилось для определения влияния устройства ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения системы электроснабжения при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне.

Имитационная модель трансформаторной подстанции системы электроснабжения с устройством ДР-ТУРН и измерительными модулями показана на рис. 2. Как видно из рис. 2, она состоит из блока питающей

сети (ПС), блока сетевого выключателя (Q1), линии электропередачи (ЛЭП), модулей основных (ТК-1) и дополнительных (ТК-2) тиристорных ключей, синхронизированных с сетью, блоков системы импульсно-фазового управления СИФУ-1 и СИФУ-2, основного (L1) и дополнительного (L2) реакторов, блока контактора переменного тока АС (от англ. Alternative Current), цехового трансформатора (ЦТ), блоков гибридных пускателей нагрузок (ГП-1, ГП-2 и ГП-3), блока автоматического выключателя QF, блоков ДОН и обратной связи (БОС), блока ФУИ гибридных пускателей [17], модулей для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения питающей сети K_{Uc} , цехового трансформатора $K_{Uцт}$ и нагрузки $K_{Uн}$, модулей для вычисления коэффициента искажения синусоидальности тока питающей сети K_{Ic} , цехового трансформатора $K_{Iцт}$ и нагрузки $K_{Iн}$, измерительных датчиков токов и напряжений, блоков активно-индуктивных нагрузок ($Z_{н-1}$, $Z_{н-2}$ и $Z_{н-3}$), а также других вспомогательных элементов.

Как показано на рис. 2, для определения влияния устройства ДР-ТУРН на несинусои-

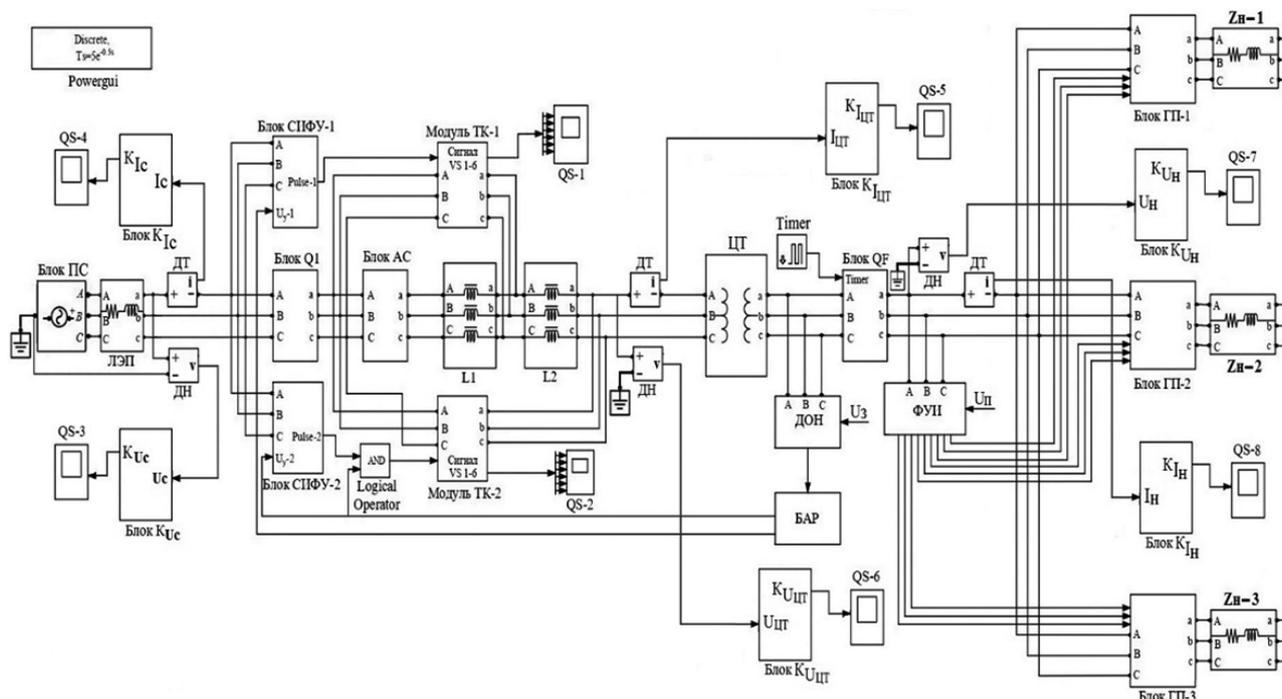


Рис. 2. Имитационная модель системы электроснабжения с устройством ДР-ТУРН и измерительными модулями для вычисления коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока
Fig. 2. A simulation model of an electric power supply system with a double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator and measuring modules for calculating the voltage non-sinusoidal coefficient and current total harmonic distortion coefficient

⁸Бутырина П.А., Гафиятуллина Р.Х., Шестакова А.А. Электроприводы. Электроснабжение: учеб. пособ. для вузов. В 3-х кн. Кн. III. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 639 с.

дальность тока и напряжения на отдельных участках систем электроснабжения измерительные модули подключены к питающей сети, цеховому трансформатору и к нагрузке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ И ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Исследование коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках СЭС проводилось при номинальном напряжении сети и номинальной нагрузке, а также при внезапном снижении напряжения сети на 5% и повышении нагрузки на 70% через две ступени по 35% относительно номинального уровня. Для большей наглядности иллюстрации физических процессов на нижеприведенных рисунках на интервалах времени T-1, T-2 и T-3 приводятся фрагменты из результатов исследований коэффициента несинусоидальности напряжения и коэффициента искажения синусоидальности тока при стабилизации напряжения у потребителей на номинальном уровне. Фрагменты, представленные на интервале времени T-1 рис. 3 а, а также рис. 4 и 5, иллюстрируют работу СЭС при номинальном напряжении питающей сети и номинальном токе активно-индуктивной нагрузки. Результаты исследования, приведенные на интервале времени T-2, иллюстрируют работу трансформаторной подстанции и потребителей электроэнергии при внезапном отклонении напряжения в питающей сети на -5% и повышении тока нагрузки на 35% относительно номинального уровня напряжения сети и тока активно-индуктивной нагрузки (интервала времени T-1). Результаты исследования, приведенные на интервале времени T-3, иллюстрируют работу трансформаторной подстанции и потребителей электроэнергии при пониженном напряжении сети на -5% и резком повышении тока активно-индуктивной нагрузки еще на 35% от тока нагрузки, который показан на интервале времени T-2, в результате чего цеховой трансформатор на этом интервале времени (интервал времени T-3) загружается на 140% и продолжает сохранять надежность питания потребителей электроэнергии.

Стоит прежде всего подчеркнуть, что на рис. 3 а и 4 а для более широкой интерпретации полученных результатов исследований влияния ДР-ТУРН на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне приводятся осциллограммы токов и напряжений из ранее проведенных исследований [17] непрерывного регулирования напряжения на высокой стороне цехового трансформатора при нестабильности напряжения питающей сети и тока нагрузки.

На осциллограмме рис. 3 а приведены действующие значения токов и напряжений питающей сети (I_c и U_c) и нагрузки (I_n и U_n) при работе трансформаторной подстанции с электрическими параметрами, иллюстрированными, соответственно, на интервалах времени T-1, T-2 и T-3, при регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора подстанции. Фрагментами, представленными на интервалах времени T-1, T-2 и T-3, иллюстрируется работа цехового трансформатора при нестабильности напряжения в сети и тока на нагрузке, где продолжительность его работы в каждом интервале времени составляет не меньше 10 мин. Здесь кривая U_n иллюстрирует работоспособность устройства ДР-ТУРН при стабилизации напряжения у потребителей на заданном уровне в случае возникновения отклонения напряжения в питающей сети и тока нагрузки на шине распределительного устройства цехового трансформатора [17]. Полученные результаты этих численных экспериментов позволили построить интегральную характеристику стабилизации напряжения у потребителей. Она представлена на рис. 3 б и характеризует работоспособность предлагаемого управляемого регулятора напряжения.

Из интегральной характеристики стабилизации напряжения (рис. 3 б) хорошо заметно, что применение предлагаемого ДР-ТУРН взамен традиционного механического регулятора (сезонного регулятора) напряжения типа ПБВ в составе существующих трансформаторных подстанций позволяет сохранить номинальное напряжение на шинах распределительных устройств с хорошими технико-экономическими показателями, несмотря на нестабильность на-

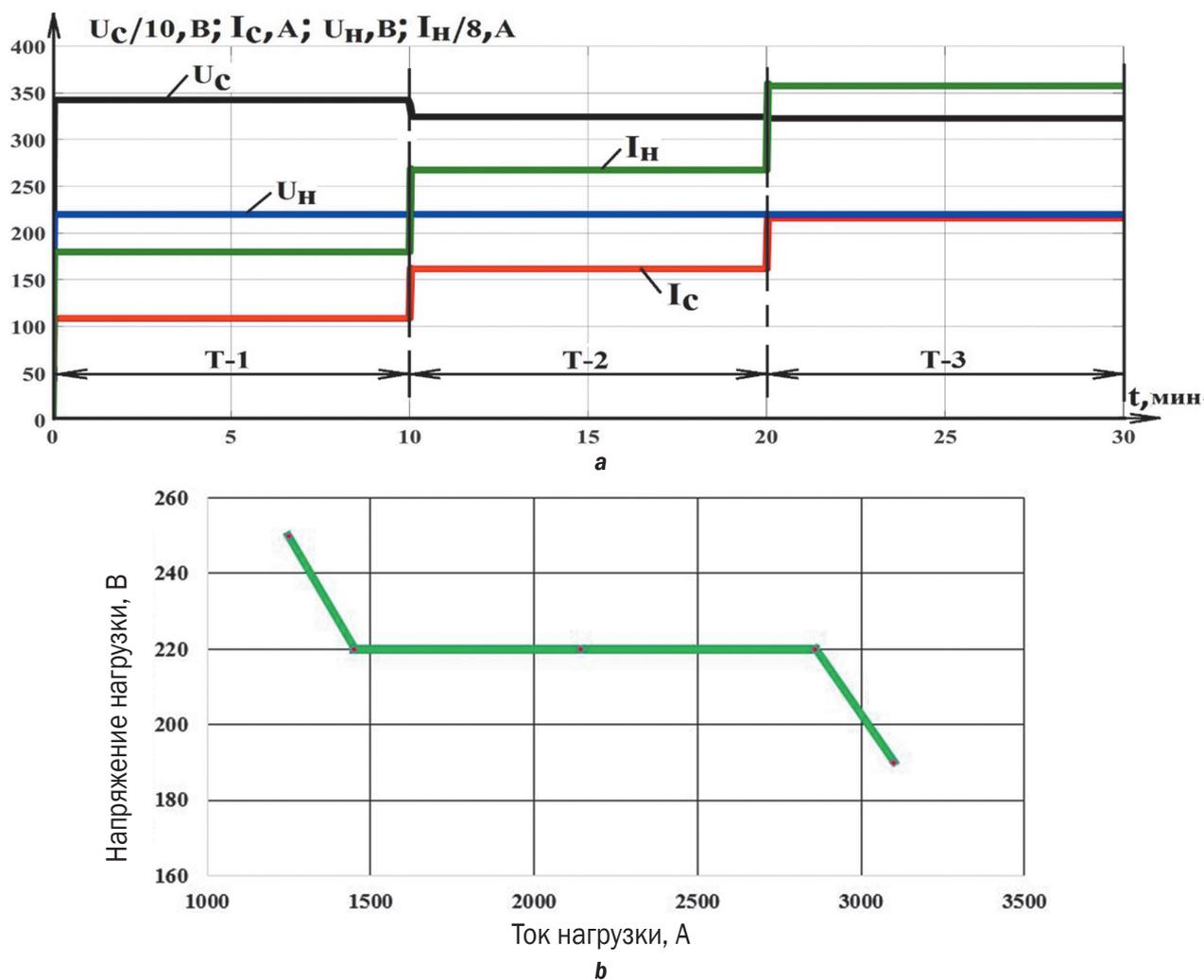


Рис. 3. Осциллограммы действующих значений токов и напряжений (а) и интегральная характеристика стабилизации напряжения потребителей электроэнергии (б)

Fig. 3. Oscillograms of effective current and voltage values (a) and integral characteristic of voltage stabilization of electric power consumers (b)

пряжения сети и тока нагрузки, благодаря расширению функциональных возможностей предлагаемого технического решения и специализированному способу управления им [16].

Ниже приведены результаты исследования коэффициентов несинусоидальности напряжения и искажения синусоидальности тока на разных участках СЭС при непрерывном регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора с устройством ДР-ТУРН, проведенного для оценки влияния управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения в системах электроснабжения.

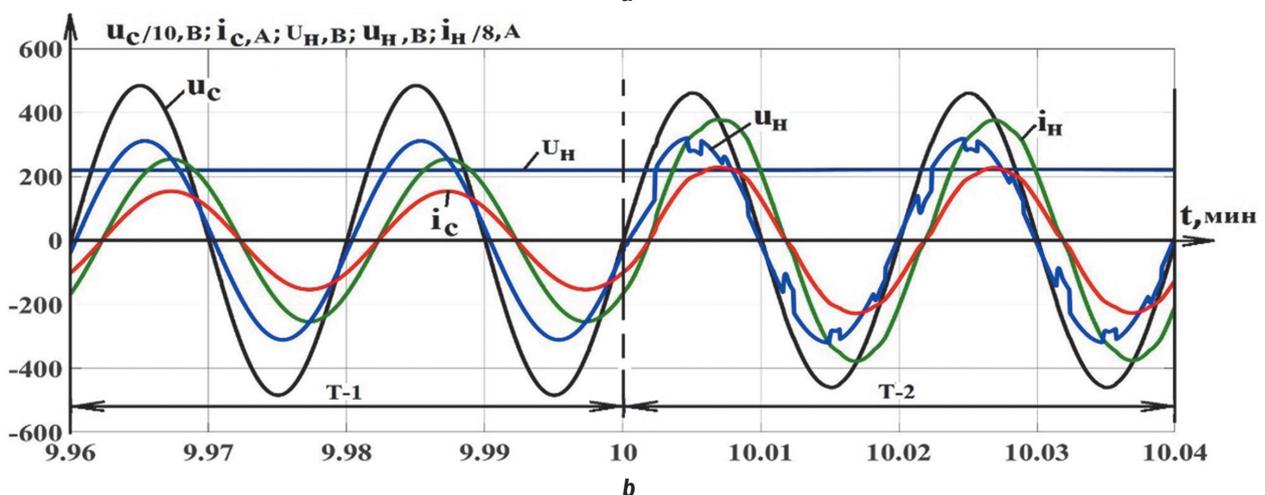
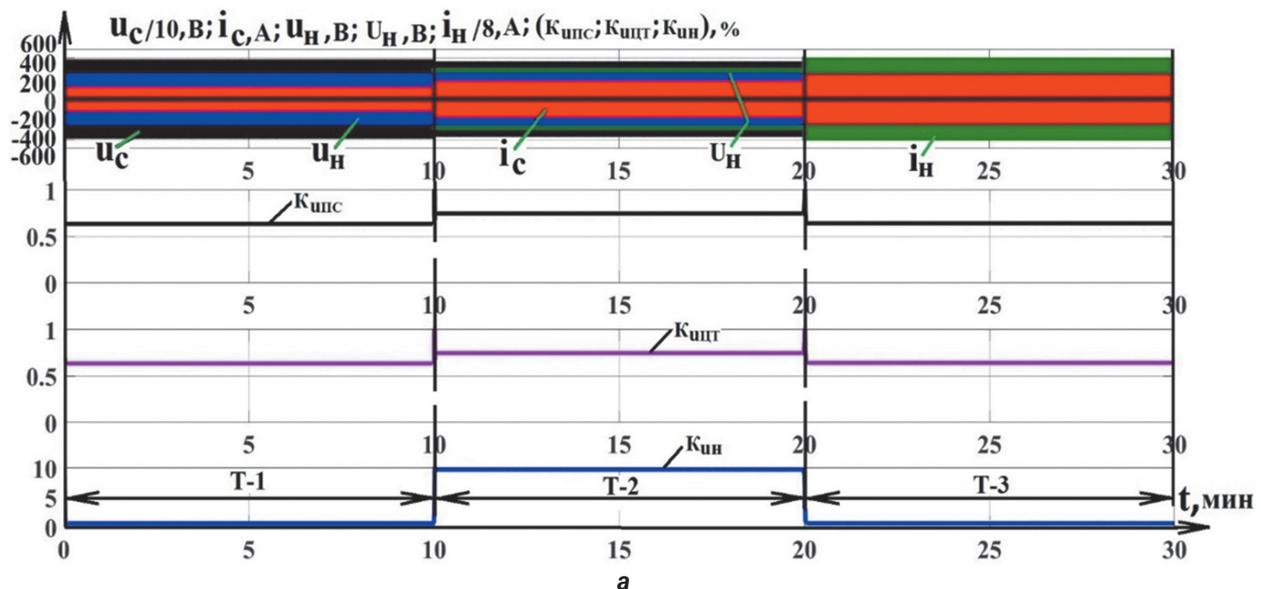
Полученные результаты исследования коэффициента несинусоидальности напряжения на разных участках СЭС при непре-

рывном регулировании напряжения на высокой стороне цехового трансформатора с предлагаемым ДР-ТУРН представлены на рис. 4 а, тогда как на рис. 4 б-д для более широкой интерпретации полученных результатов исследования влияния предлагаемого устройства на несинусоидальность тока и напряжения приводятся фрагменты из процесса стабилизации напряжения, где также дополнительно иллюстрируется ступенчатое повышение нагрузки. Важно отметить, что продолжительность исследования коэффициента несинусоидальности напряжения при разных углах управления тиристорных ключей в каждом интервале времени составила не менее 10 мин. Для оценки влияния ДР-ТУРН на несинусоидальность напряжения сети, цехового трансформатора и нагрузки на

интервалах времени T-1, T-2 и T-3 на рис. 4 а приводятся фрагменты из полученных результатов исследования, где продолжительность исследования коэффициента несинусоидальности напряжения в каждом интервале времени составляет не меньше 10 мин. На осциллограммах рис. 4 приведенные надписи означают мгновенные значения токов и напряжений питающей сети (i_c и u_c) и нагрузки (i_n и u_n), действующие значения напряжения нагрузки (U_n), а также коэффициента несинусоидальности напряжения питающей сети $K_{u\text{nc}}$, цехового трансформатора $K_{u\text{цт}}$ и активно-индуктивной нагрузки $K_{u\text{ин}}$. Из результатов этого исследования видно, что предлагаемый управляемый регулятор напряжения при номинальном напряжении сети и токе активно-индуктивной нагрузки (интервал времени T-1), а также при снижении напряжения в сети на 5% и повышении тока активно-индуктивной нагрузки на 70% (интервал времени

T-3) относительно номинальных параметров не создает несинусоидальность напряжения на элементах СЭС. На интервале времени T-2 устройство ДР-ТУРН, сохраняя номинальный уровень напряжения на шине распределительного устройства цехового трансформатора, вносит гармонические составляющие в напряжение сети и цехового трансформатора на 0,78%, а потребителя электроэнергии на 9,8%, что не превышает допустимые нормы, установленные ГОСТом³.

По результатам анализа исследования коэффициента несинусоидальности напряжения при непрерывном регулировании напряжения с устройством ДР-ТУРН можно заявить, что предлагаемое устройство, поддерживая напряжение у потребителей на заданном уровне (см. рис. 4, кривая U_n) при разных уровнях напряжения питающей сети и тока нагрузки, не вносит гармонических составляющих в напряжение всех элемен-



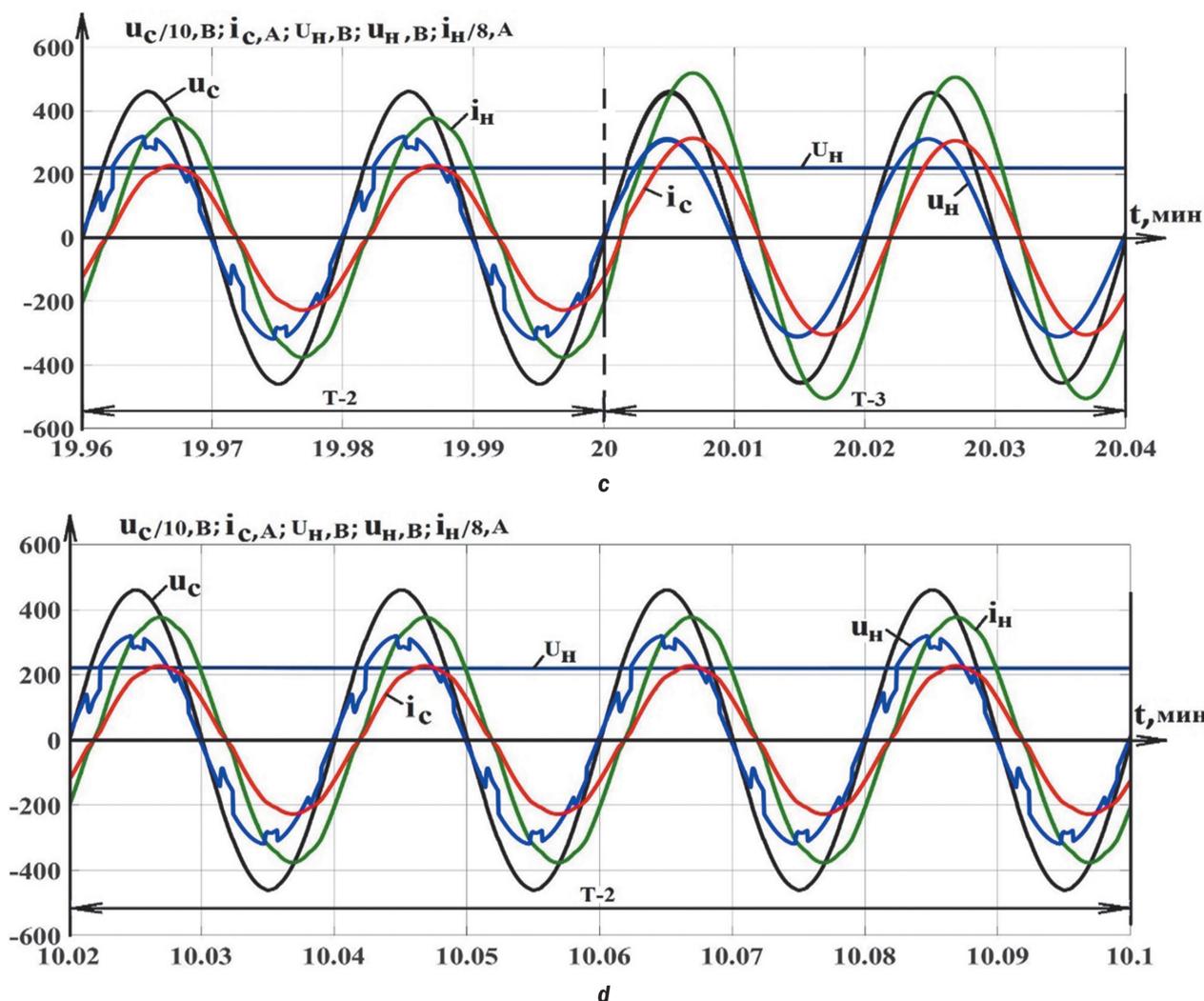


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжений и коэффициента несинусоидальности напряжения на разных участках системы электроснабжения с ДР-ТУРН (а-д)

Fig. 4. Oscillograms of currents and voltages and the voltage non-sinusoidality coefficient in the different sections of the power supply system with a double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator (a-d)

тов СЭС на интервалах времени Т-1 и Т-3. Устройство ДР-ТУРН, поддерживая номинальное напряжение у потребителей на заданном уровне, искажает синусоидальность формы напряжения только на интервале времени Т-2, при этом величины искажений соответствуют предельно допустимым нормам и не повышаются до максимального значения нормы, установленной отечественным³ и международным⁴ стандартами. Это также показывает эффективность работы предлагаемого ДР-ТУРН и улучшение энергетических показателей СЭС в интервале времени Т-2.

Следующие осциллограммы (рис. 5) иллюстрируют коэффициент искажения синусоидальности тока на разных участках системы электроснабжения при стабилизации

напряжения у потребителей на номинальном уровне при разных углах управлений тиристорных ключей. Осциллограммы рис. 5 а иллюстрируют влияние ДР-ТУРН на синусоидальность формы токов сети, цехового трансформатора и нагрузки, а осциллограммы, представленные на рис. 5 б, с демонстрируют изменения физических процессов при разных углах управлений тиристорных ключей в процессе стабилизации напряжения у потребителей при нестабильности напряжения в сети и тока на нагрузке.

Стоит подчеркнуть, что коэффициент искажения тока исследовался в каждом интервале времени не меньше 10 мин. Для иллюстрации и оценки влияния ДР-ТУРН на искажение тока сети, цехового трансформатора и нагрузки на рис. 5 а на интервалах времени

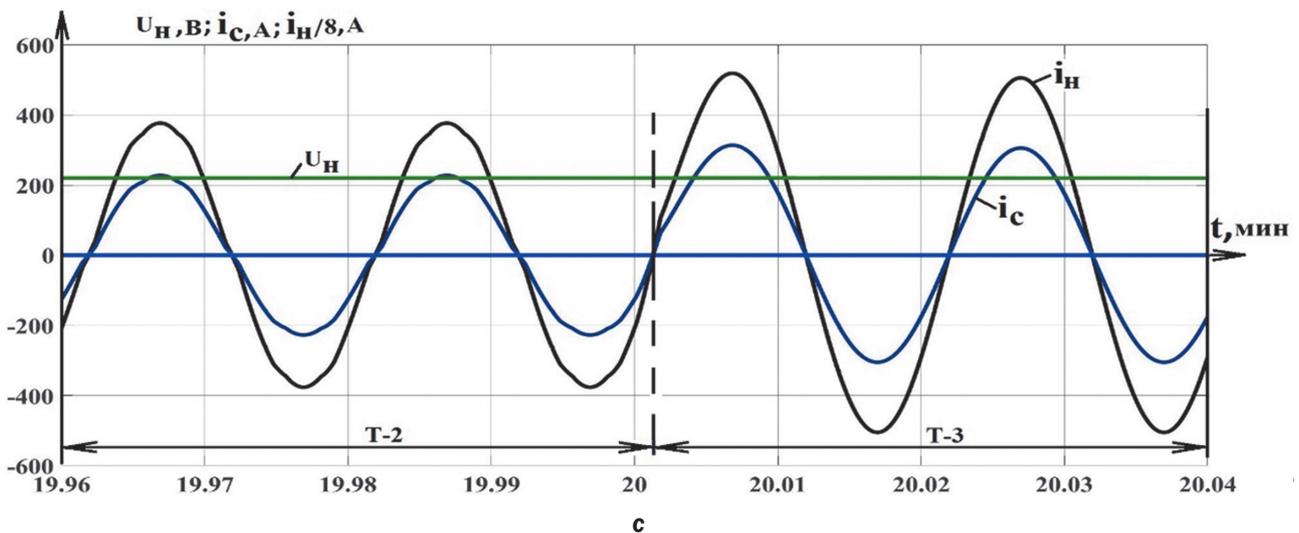
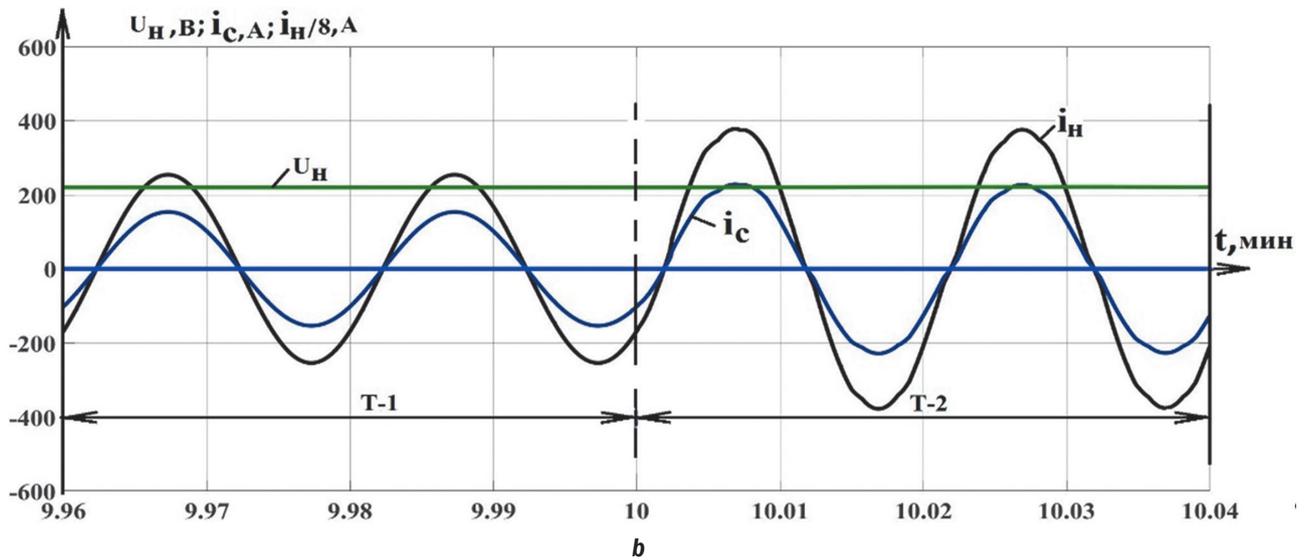
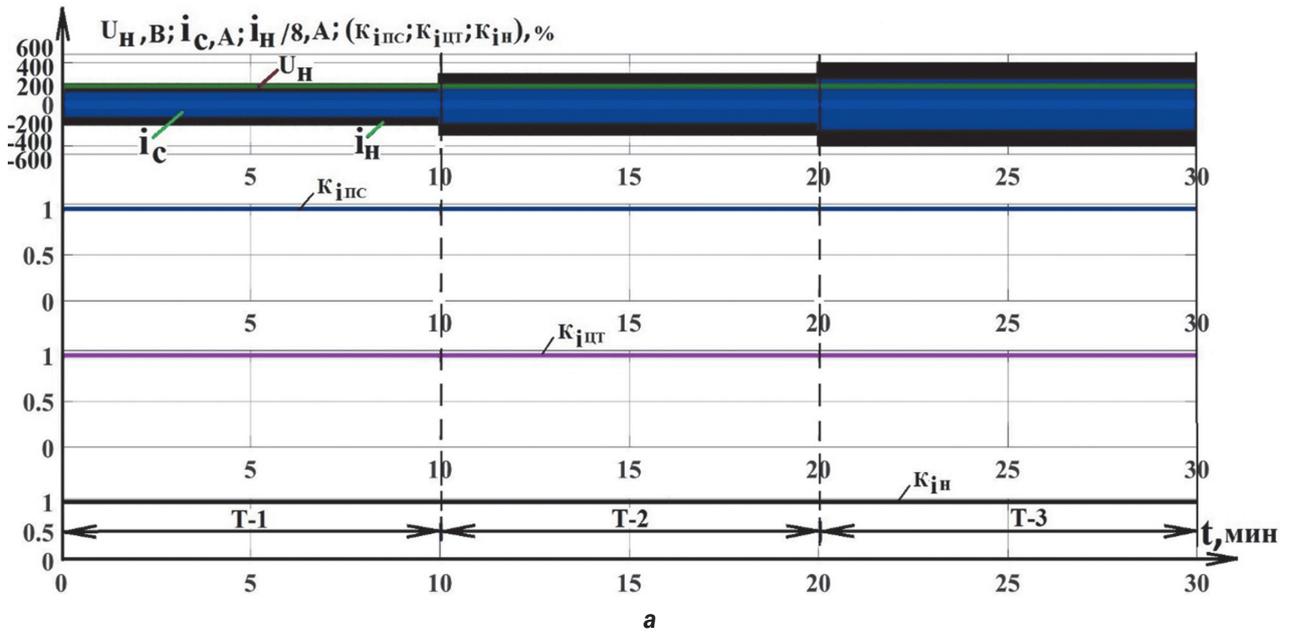


Рис. 5. Осциллограммы токов и напряжений и коэффициента искажения синусоидальности тока на разных участках системы электроснабжения с устройством ДР-ТУРН (а-с)

Fig. 5. Oscillograms of currents and voltages and a current total harmonic distortion coefficient in the different sections of the power supply system with a double-subrange reactor-thyristor controlled voltage regulator (a-c)

T-1, T-2 и T-3 приводятся фрагменты из полученных результатов исследования, где продолжительность исследования в каждом интервале времени составляет не меньше 10 мин.

На этих осциллограммах приведены мгновенные значения токов сети i_c и нагрузки i_n , действующие значения напряжения нагрузки U_n , а также коэффициенты искажения синусоидальности тока сети $K_{ипс}$, цехового трансформатора $K_{цт}$ и активно-индуктивной нагрузки $K_{ин}$. Результаты этого исследования показывают, что устройство ДР-ТУРН не искажает синусоидальной формы токов всех элементов системы электропитания. Как известно, это позволяет не только поддерживать качество электроэнергии в отношении сохранения номинального напряжения и синусоидальной формы напряжения в СЭС, улучшать точность работы аппаратуры РЗА, сохранять срок службы электрооборудования, но и избегать дополнительных потерь электроэнергии при ее транспортировке.

Анализ результатов исследования стабилизации напряжения у потребителей и влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках при нестабильности тока и напряжения показал, что, несмотря на внешние и внутренние изменения электрических параметров, применение предлагаемого устройства и расширение его функциональных возможностей позволяет устранить недостатки широко распространенных механических и гибридных регуляторов напряжения, связанных с ухудшением качества электроэнергии и технико-экономических показателей.

Полученные результаты исследования стабилизации напряжения у потребителей и влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при разных режимах работы подтверждают, что устройство ДР-ТУРН, поддерживая номинальное напряжение на шинах распределительного устройства, сохраняет также высокое значение технико-экономических показателей.

Стоит в первую очередь подчеркнуть, что для большего расширения функциональных возможностей устройства ДР-ТУРН с целью

сохранения высоких значений технико-экономических показателей электроустановки, учитывая величины отклонения и колебания напряжения, необходимо для каждого исследуемого объекта индивидуально разработать ДР-ТУРН с определенными индуктивными сопротивлениями реакторов и собственным способом управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследования влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС при стабилизации напряжения у потребителей позволили сделать следующие выводы:

1. При анализе научных работ отечественных и зарубежных ученых, а также опыта эксплуатации систем электроснабжения выяснилось, что существующие трансформаторные подстанции нуждаются в применении нового автоматизированного технического решения для улучшения качества электроэнергии и технико-экономических показателей электроустановки.

2. Предлагаемый ДР-ТУРН, несмотря на снижение напряжения питающей сети и повышение тока нагрузки, одновременно с поддержанием номинального значения напряжения у потребителей на заданном уровне повышает технико-экономические показатели СЭС.

3. Полученными результатами исследования влияния нового управляемого регулятора напряжения на несинусоидальность тока и напряжения на разных участках СЭС в стационарных и динамических режимах работы цехового трансформатора показано, что предлагаемый ДР-ТУРН при снижении напряжения в сети на 5% и повышении тока активно-индуктивной нагрузки на 35% искажает синусоидальность формы напряжения питающей сети и цехового трансформатора на 0,78%, а потребителей электроэнергии на 9,8%, что не превышает предельно допустимые нормы, установленные ГОСТом.

4. Установлено, что предлагаемый ДР-ТУРН при нестабильности напряжения питающей сети и тока нагрузки, поддерживая номинальное значение напряжения у потребителей на заданном уровне, не создает несинусоидальность тока в системах электроснабжения. Кроме этого, благодаря

гибридным пускателям нагрузки, включение нагрузки производится без бросков токов и просадов напряжения, а выключение

нагрузки выполняется без возникновения электрической дуги, коммутационных потерь и перенапряжений.

Список источников

1. 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.
2. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Кижин В.В. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13>. EDN: HQLXTA.
3. 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.
4. 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.
5. Виноградов А.В., Бородин М.В., Лансберг А.А. Анализ жалоб потребителей электрической энергии в электросетевых компаниях // Инновационные подходы образовательной деятельности в условиях цифровой трансформации отраслей АПК: матер. Всерос. (национальной) науч. конф. (г. Орел, 21 апреля 2022 г.). Орел: Орловский гос. аграрный ун-т им. Н.В. Парахина, 2022. С. 94–98. EDN: SHQIFU.
6. Лансберг А.А., Панфилов А.А., Виноградов А.В. Анализ возможных способов несанкционированной подачи напряжения в электрических сетях 0,4–10 кВ и последствий от этого // Научный журнал молодых ученых. Технические науки. 2022. № 2. С. 43–50. EDN: DZUNEE.
7. 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 & Energy Systems. 2012. Vol. 42. Iss. 1. P. 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.007>.
8. 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>.
9. 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. Vol. 13. Iss. 21. P. 5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>.
10. Vinogradov A., Vinogradova A., Golikov I., Bolshov 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. 2018–2026. <https://doi.org/10.1515/ijeeps2018-0269>.
11. 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>.
12. 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>.
13. Haque M.H. Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM in Proc // IEEE Porto Power Tech Proceedings. 2001. <https://doi.org/10.1109/PTC.2001.964609>.
14. Большев В.Е., Виноградов А.В. Разработка технических средств мониторинга отключений и отклонения напряжения на вводах сельских потребителей: монография. Саратов: Вузовское образование, 2021. 205 с.
15. Макашева С.И. Качество электрической энергии: мониторинг, прогноз, управление: монография. Хабаровск: ДВГУПС, 2020. 114 с.
16. Пат. № 2667095, Российская Федерация, Н02М 5/25, G05F1/30. Способ управления пускорегулирующим устройством силового трансформатора / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров; заявитель и патентообладатель Климаш В.С., Табаров Б.Д. Заявл. 29.12.2017; опубл. 14.09.2018. Бюл. № 26.
17. Табаров Б.Д., Соловьев В.А., Сериков А.В. Система стабилизации напряжения потребителей при нестабильности питающего напряжения и колебаниях тока нагрузки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23. № 3. С. 41–50. <https://doi.org/10.14529/power230304>. EDN: TJZKZW.
18. Климаш С.В., Климаш В.С., Власьевский С.В. Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде MatLab // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 3. С. 11–16. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16).
19. Климаш В.С., Константинов А.М. Преобразователи электроэнергии для систем электроснабжения промышленных предприятий: монография. Хабаровск: ДВГУПС, 2012. 106 с.

20. Файда Е.Л., Сивкова А.П. Трансформаторные стабилизаторы переменного напряжения с регулированием на первичной стороне // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 3. С. 41–45. EDN: SQUIST.

References

1. 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.
2. Bulatov Yu.N., Kryukov A.N., Suslov K.V., Kizhin V.V. Coordinated management of electricity storages and distributed generation plant with predictive controllers in a power supply system with reduced electricity quality. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(6):3-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-3-13>. EDN: HQLXTA.
3. 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.
4. 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.
5. Vinogradov A.V., Borodin M.V., Lansberg A.A. Analysis of complaints of consumers of electric energy in electric grid companies. In: *Innovacionnye podhody obrazovatel'noj deyatel'nosti v usloviyah cifrovoy transformacii otraslej APK: materialy Vserossijskoj (nacional'noj) nauchnoj konferencii = Innovative approaches to educational activities in the context of digital transformation of the agro-industrial complex: Proceedings of All-Russian (national) scientific conference*. 21 April 2022, Orel. Orel: Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; 2022, p. 94-98. (In Russ.). EDN: SHQIFU.
6. Lansberg A.A., Panfilov A.A., Vinogradov A.V. Analysis of possible methods of unauthorized voltage supply in 0.4-10 kV electrical networks and their consequences. *Nauchnyj zhurnal molodyh uchenyh. Tekhnicheskie nauki*. 2022;2:43-50. (In Russ.). EDN: DZUNEE.
7. 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 & Energy Systems*. 2012;42(1):139-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.007>.
8. 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>.
9. 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>.
10. 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>.
11. 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>.
12. 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>.
13. Haque M.H. Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM. In: *IEEE Porto Power Tech Proceedings*. 2001. <https://doi.org/10.1109/PTC.2001.964609>.
14. Bol'shev V.E., Vinogradov A.V. *Development of technical means to monitor outages and voltage deviations at rural consumer inputs*. Saratov: Vuzovskoe obrazovanie; 2021, 205 p. (In Russ.).
15. Makasheva S.I. *Electric energy quality: monitoring, forecast, control*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2020, 114 p. (In Russ.).
16. Klimash V.S., Tabarov B.D. *Power transformer starting device control method*. Patent RF, no. 2667095; 2018. (In Russ.).
17. Tabarov B.D., Solovyev V.A., Serikov A.V. A voltage stabilization system for voltage supply instability and load current fluctuations. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;23(3):41-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power230304>. EDN: TJZKZW.
18. Klimash S.V., Klimash V.S., Vlas'evskij S.V. Specialized modules for calculation of energy coefficients of electrical engineering devices in MatLab. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2017;3:11-16. (In Russ.). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3\(36\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16).
19. Klimash V.S., Konstantinov A.M. *Electric power converters for power supply systems of industrial enterprises*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University; 2012, 106 p. (In Russ.).
20. Faida E.L., Sivkova A.P. Transformer stabilizers of alternating voltage with regulation on the primary side. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2014;14(3):41-45. (In Russ.). EDN: SQUIST.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Табаров Бехруз Довудходжаевич,
к.т.н.,
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>

Заявленный вклад автора

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.03.2024 г.; одобрена после рецензирования 22.04.2024 г.; принята к публикации 30.04.2024 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Bekhruz D. Tabarov,
Cand. Sci. (Eng.),
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>

Author contribution

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

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

The author read and approved the final version of the manuscript.

Information about the article

The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 22.04.2024; accepted for publication 30.04.2024.