



ВЫБОР СХЕМНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АДАПТИВНЫХ СЕТЯХ С ТЯГОЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Н.В. Савина¹, И.А. Лисогурский¹, Л.Н. Лисогурская¹

¹Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия
nataly-savina@mail.ru, ivan_2404@mail.ru, kalinichenko-lid@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Анализ существующих схемных и технических решений для улучшения качества электроэнергии в сетях с тяговой нагрузкой и оценка их соответствия новым свойствам электрической сети при переходе на активно-адаптивную платформу. *Определение особенностей работы электрических сетей с тяговой нагрузкой при переходе на активно-адаптивную платформу. Характеристика существующих технических средств и схемных решений для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой и их анализ на предмет соответствия новым свойствам электрической сети. МЕТОДЫ.* Для решения поставленных задач был выполнен структурный анализ существующих технических и схемных решений для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В данной статье произведена систематизация соответствия технических средств решаемым проблемам в области качества электроэнергии. *Определены особенности работы электрических сетей с тяговой нагрузкой при переходе на активно-адаптивную платформу. Выявлены современные технические средства и схемные решения, соответствующие новым свойствам электрической сети. Предложен вариант комбинирования технологий для комплексного влияния на показатели качества электроэнергии. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* При переходе электрических сетей с тяговой нагрузкой на активно-адаптивную платформу в целях улучшения качества электроэнергии целесообразно применять технические средства, способные обеспечивать ПКЭ в допустимых пределах в режиме реального времени в зависимости от режимов работы энергосистемы и тяговой нагрузки. К таким средствам относятся распределенная генерация, накопители электрической энергии, активные фильтрокомпенсирующие и симметрирующие устройства, FACTS технологии второго поколения. Классические подходы решения проблем с качеством электрической энергии, основанные на применении пассивных технических устройств, не соответствуют новым свойствам активно-адаптивных сетей с тягой переменного тока.

Ключевые слова: *качество электроэнергии; тяга переменного тока; СТАТКОМ; активные фильтры; FACTS технологии.*

Для цитирования: Савина Н.В., Лисогурский И.А., Лисогурская Л.Н. Выбор схемных и технических решений для улучшения качества электроэнергии в адаптивных сетях с тягой переменного тока // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 42-54. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-42-54.

SELECTION OF CIRCUIT AND TECHNICAL SOLUTIONS FOR IMPROVEMENT THE QUALITY OF ELECTRICITY IN ADAPTIVE NETWORKS WITH TRACTION AC POWER

NV. Savina¹, IA. Lisogurskiy¹, LN. Lisogurskaya¹

¹Amur State University, Blagoveshchensk, Russia
nataly-savina@mail.ru, ivan_2404@mail.ru, kalinichenko-lid@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Analysis of existing circuit and technical solutions for improving the quality of electricity in networks with traction load and assessment of their compliance with new properties of the electric network when switching to an active adaptive platform. *Determination of the features of the operation of electric networks with traction load during the transition to*

an active-adaptive platform. Review of existing technical means and circuit solutions for improving the quality of electricity in electric networks with traction load and their analysis for compliance with new properties of the electric network. METHODS. To solve the tasks set, a structural analysis of existing technical and circuit solutions was performed to improve the quality of electricity in electric networks with traction load. RESULTS. In this article, the systematization of the compliance of technical means with the solved problems in the field of electricity quality is carried out. The features of the operation of electric networks with traction load during the transition to an active-adaptive platform are determined. Modern technical means and circuit solutions corresponding to the new properties of the electrical network are revealed. A variant of combining technologies for a complex effect on the quality of electricity is proposed. CONCLUSION. When switching electric networks with traction load to an active adaptive platform in order to improve the quality of electricity, it is advisable to use technical means capable of providing PCE within acceptable limits in real time, depending on the operating modes of the power system and traction load. Such means include distributed generation, electric energy storage, active filter-compensating and balancing devices, FACTS technologies of the second generation. Classical approaches to solving problems with the quality of electrical energy based on the use of passive technical devices do not correspond to the new properties of active-adaptive networks with alternating current traction.

Keywords: power quality; AC traction; static current; active filters; FACTS technologies.

For citation: Savina NV, Lisogurskiy I.A, Lisogurskaya LN. Selection of circuit and technical solutions for improvement the quality of electricity in adaptive networks with traction AC power. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3):42-54. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-42-54.

Введение и литературный обзор

Электрифицированный железнодорожный транспорт – крупный потребитель электрической энергии, негативно влияющий на показатели качества электроэнергии (ПКЭ), нормируемые¹. Тяга переменного тока, как передвижной источник несимметрии и несинусоидальности токов и напряжений, приводит к снижению эффективности и надежности функционирования электрических сетей [1].

Наряду с возникновением несимметричных режимов работы трехфазной питающей сети, а также появлением высших гармоник, источниками которых являются используемые на электроподвижных составах выпрямительные агрегаты с полупроводниковыми преобразователями, тяговая нагрузка приводит к появлению отклонений напряжения и колебаний напряжения. При этом последний упомянутый параметр качества электроэнергии, на который оказывает негативное влияние тяга переменного тока, связан с широко применяемым в железнодорожном транспорте рекуперативным торможением, позволяющим реализовать возврат электрической энергии в контактную сеть.

Важно отметить нестационарность случайных процессов изменения ПКЭ в электрических сетях с тяговой нагрузкой. Данная особенность связана с тем, что каждый электроподвижной состав является передвижным источником искажения качества электроэнергии. При этом суммирование искажений от разных поездов, количество которых постоянно изменяется, может привести как к наложению и усилению негативного влияния на ПКЭ, так и к взаимной компенсации негативных воздействий.

Улучшение качества электроэнергии приводит к увеличению срока службы электрооборудования, уменьшению эксплуатационных издержек, сокращению дополнительных потерь электроэнергии в элементах электрической сети. Снижение негативного влияния на класс точности электроизмерительных приборов повлечет за собой уменьшение количества ошибок и отказов в работе систем релейной защиты и автоматики, выполненных на базе микропроцессорных устройств. Приведение к допустимым значениям ПКЭ, относящихся к несинусоидальности, несимметрии, колебаниям напряжения и электромагнитным помехам, источником которых является тяга переменного тока, положительно влияет на надежность функционирования

¹ ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения 08.04.2022г)

электрических сетей с тяговой нагрузкой. В свою очередь, это приведет к уменьшению экономического ущерба от недоотпуска электроэнергии, связанного с внезапными и постепенными отказами.

Вопросам улучшения качества электрической энергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой уделено большое внимание в отечественных и зарубежных источниках. Существующие схемные и технические решения, в том числе базирующиеся на применении инновационных технологий, рассмотрены достаточно подробно. Значительная часть работ [2,3,4,5] посвящена применению регулируемых средств компенсации реактивной мощности для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях с тягой переменного тока. С целью улучшения ПКЭ по несинусоидальности отмечена целесообразность применения пассивных [6,7,8] и активных [2,4,9,10] фильтров гармоник. Для улучшения ПКЭ по несимметрии существуют схемы симметрирования, подлежащие периодическому улучшению в связи с появлением новых технологий [11,12,13]. В источниках [2,14] рассмотрено применение энергетических роутеров, являющихся одной из технологий *Smart Grid*, с целью повышения качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей железных дорог.

Как показал анализ проблема качества электроэнергии достаточно широко исследована в традиционных электрических сетях с тяговой нагрузкой, но опыт эксплуатации показывает их низкую эффективность.

Целесообразность перехода электрических сетей с тягой переменного тока на активно-адаптивную платформу обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности их функционирования, что может быть обеспечено внедрением современных технических средств совместно с интеллектуальной системой мониторинга и управления. Анализ современных технических средств для улучшения качества электрической энергии, а также оценка возможности их использования в адаптивном режиме работы электрической сети с тяговой нагрузкой, является важной актуальной задачей, требующей решения.

При этом предложенные варианты решения проблем обеспечения ПКЭ в допустимых пределах должны быть проанализированы на возможность их применения в условиях внедрения концепции «интеллектуальных сетей» в электрические сети с тягой переменного тока, т.к. перевод данных сетей на активно-адаптивную платформу является развитием решения проблемы качества электроэнергии в сетях с тяговой нагрузкой, что обуславливает актуальность данной статьи.

Научная значимость работы заключается в выявлении технических средств и схемных решений, способных оказывать положительное влияние на качество электроэнергии, обеспечивая его оптимальные параметры в любой момент времени, при переводе электрических сетей, питающих тяговую нагрузку, в активно-адаптивные сети.

Целью данной статьи является анализ существующих схемных и технических решений для улучшения качества электроэнергии в сетях с тяговой нагрузкой и оценка их соответствия новым свойствам электрической сети при переходе на активно-адаптивную платформу.

В рамках достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определение особенностей работы электрических сетей с тяговой нагрузкой при переходе на активно-адаптивную платформу.
2. Характеристика существующих технических средств для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях с тягой переменного тока и их анализ на предмет соответствия новым свойствам электрической сети.
3. Выявление схемных решений, наиболее предпочтительных в условиях перехода к новой концепции «умной» электрической сети.

Активно-адаптивная сеть (ААС), согласно ², представляет собой совокупность подключенных к генерирующим источникам и потребителям энергии элементов электрических сетей и систем управления, включающих компоненты базовых технологий адаптивного управления электрической сетью, таких как технологии аккумулирования электроэнергии, технологии сверхпроводимости, токоограничивающие устройства, технологии цифровой подстанции, технологии мониторинга и диагностики электрических сетей и другие.

Переход электрических сетей с тяговой нагрузкой на активно-адаптивную платформу подразумевает появление в данных сетях управляемых сетевых элементов, а

² Россети ФСК ЕЭС. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [Электронный ресурс]. – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf. (дата обращения 08.04.2022г)

также внедрение систем контроля и управления качеством электроэнергии и надежностью электроснабжения в узлах сети. Применение данной концепции создаст возможности для осуществления оперативного реагирования на любые изменения режима работы энергосистемы в режиме реального времени оптимальными управляющими воздействиями, изменяя параметры сети. При этом, новые свойства электрических сетей с тягой переменного тока, такие как адаптивность, гибкость, многофункциональность, должны быть обеспечены внедрением современных технических устройств.

Материалы и методы

Для реализации базовых технологий адаптивного управления электрической сетью существует широкий спектр технических устройств, часть из которых можно использовать для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой [15]. В целях улучшения качества электроэнергии в данных сетях необходимо применять технические устройства, которые смогут обеспечить изменение ПКЭ и параметров электрической сети в требуемых пределах в режиме мониторинга в зависимости от режимов работы энергосистемы и тяги переменного тока.

На рисунке 1 представлена обобщенная классификация технических средств для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой. Произведена систематизация соответствия технических средств решаемым проблемам в области качества электроэнергии.

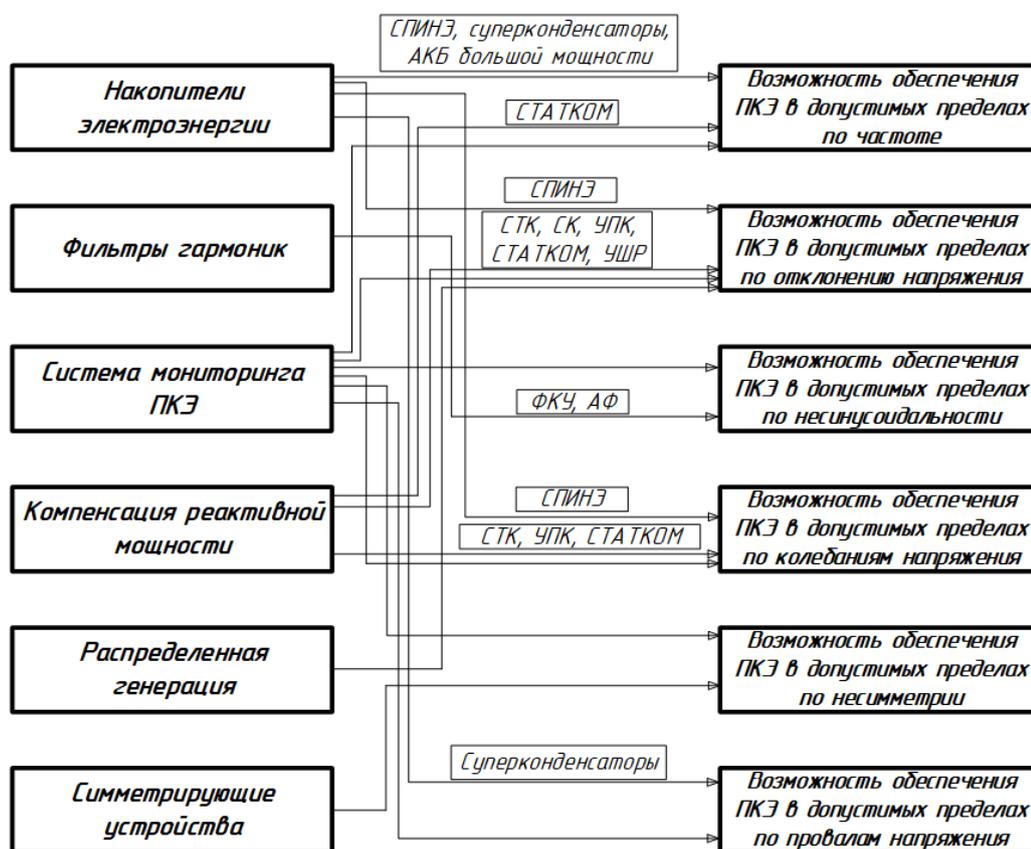


Рис. 1. Классификация технических средств для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой.

Fig. 1. Classification of technical means for managing the quality of electricity in electric networks with traction load.

Рассмотрим характеристику данных технических средств и проанализируем возможность их применения в условиях перехода электрических сетей с тягой переменного тока на активно-адаптивную платформу.

Система мониторинга ПКЭ.

Система мониторинга ПКЭ способна обеспечить в режиме реального времени сбор, обработку и анализ полной достоверной информации о текущем состоянии качества электрической энергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой.

На рынке электротехнического оборудования широко представлены средства

измерений показателей качества электрической энергии (СИ ПКЭ) как зарубежных, так и отечественных производителей. В условиях масштабной цифровизации энергетики рационально применять СИ ПКЭ с возможностью поддержки протоколов цифровой подстанции МЭК 61850. Это связано с перспективами развития цифровых тяговых подстанций, как объектов с высоким уровнем автоматизации управления.

Система мониторинга ПКЭ является технологией, обязательной к внедрению в условиях перехода электрических сетей с тяговой нагрузкой на активно-адаптивную платформу.

Распределенная генерация.

РГ может быть интегрирована в электрические сети с тягой переменного тока, что позволит регулировать напряжение в узлах сети в реальном времени, обеспечивая значения ПКЭ в оптимальных пределах по отклонению напряжения. В целях наиболее корректного регулирования напряжения в электрических сетях с РГ необходимо предусмотреть внедрение гибкой схемы управления, основанной на автоматизации подстанций и современных коммуникационных технологиях [16].

Важно учитывать специфическое влияние РГ на качество электрической энергии. Наряду с положительным воздействием, связанным с поддержанием уровней напряжения в узлах сети в оптимальных пределах, РГ негативно влияет на ПКЭ по несинусоидальности, являясь источником высших гармоник. Также, в сетях с РГ могут возникать колебания напряжения и частоты, приводящие к появлению фликера.

Однако, данные проблемы негативного влияния РГ на качество электрической энергии возможно решить применением современных прогрессивных технологий в области силовой электроники.

Накопители электрической энергии (НЭ).

НЭ относятся к базовым технологиям адаптивного управления электрической сетью. Внедрение НЭ повышает эффективность использования энергетических мощностей, увеличивает системный эффект от применения РГ, приводит к появлению активных потребителей.

Функционал НЭ позволяет производить накопление или отдачу требуемой мощности в соответствии с заданной характеристикой регулирования, что дает им возможность участвовать в регулировании частоты в энергосистеме, стабилизировать колебания генерируемой мощности и мощности нагрузки, регулировать напряжения в узлах сети, а также смягчать наведенные помехи в энергосистеме³.

Применение НЭ в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой позволит эффективно решать проблемы качества электроэнергии в части провалов и выбросов напряжения, кратковременных прерываний, переходных перенапряжений, быстрых изменений напряжения.

Важно отметить, что тяга переменного тока при определенных условиях может выполнять функциональные возможности НЭ.

Фильтры гармоник.

Отрицательное влияние гармонических искажений на электроэнергетическую систему, приводящее к увеличению потерь электроэнергии в электроустановках, некорректной работе релейной защиты и автоматики, а также к другим негативным последствиям, на сегодняшний день является актуальной проблемой в связи с резким увеличением повсеместного использования искажающих сеть вентильных преобразователей электрической энергии.

Классическим решением проблемы негативного влияния высших гармоник является применение силовых резонансных фильтров (фильтрокомпенсирующих устройств). Данное устройство является многофункциональным. Упрощенные схемы силовых резонансных фильтров изображены на рисунке 2. Помимо снижения уровня высших гармоник, силовые резонансные фильтры могут решать задачу компенсации реактивной мощности из-за наличия батарей конденсаторов в составе устройства, являющихся источниками реактивной мощности. [17]

Силовые резонансные фильтры являются статическими устройствами. Они не способны эффективно корректировать ПКЭ по несинусоидальности в режиме мониторинга в условиях изменения гармонического состава токов и напряжений. Следовательно, данные технические устройства не могут быть использованы при

³ ГОСТ Р 58092.3.1-2020. «Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Проектирование и оценка рабочих параметров. Общие требования» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200173637> (дата обращения 08.04.2022г)

реализации перехода электрических сетей с тяговой нагрузкой на адаптивную платформу. Такой же вывод можно сделать и о фильтросимметрирующих устройствах, являющихся несимметричными фильтрами, состоящими из пассивных компонентов.

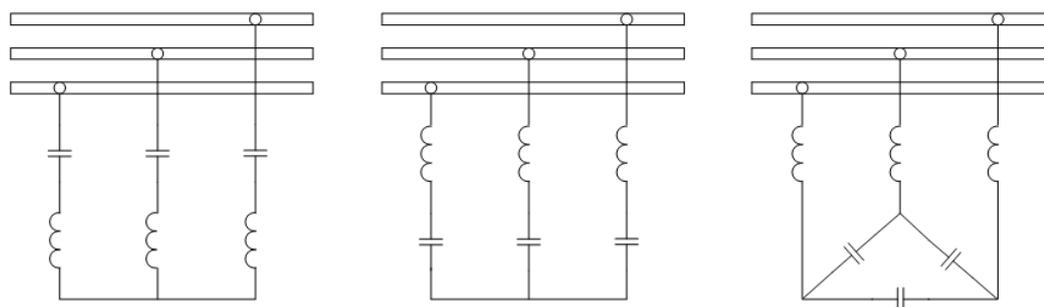


Рис. 2. Упрощенные схемы силовых резонансных фильтров.

Fig. 2. Simplified schemes of power resonant filters.

Проблема фильтрации высших гармоник в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой может быть решена при помощи активных и гибридных фильтров, способных в зависимости от работы энергосистемы и тяги переменного тока изменять собственные характеристики, обеспечивая ПКЭ в допустимых пределах по несинусоидальности в режиме мониторинга.

Вопросами разработки активных фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств (АФКУ) в части теоретических и методических основ их проектирования, а также внедрением пилотных проектов занимаются различные научно-производственные предприятия. На современном рынке представлены АФКУ шунтирующего и серийного типа.

Комплексным решением задачи улучшения ПКЭ в электрических сетях, связанных с отклонением напряжения, несинусоидальностью и несимметрией является применение шунтирующего АФКУ на основе статического компенсатора реактивной мощности (СТАТКОМ). В качестве альтернативы применению резонансных фильтров, возможно использование шунтирующего гибридного активного фильтра, способного в режиме реального времени обеспечить адаптивную фильтрацию и демпфирование гармоник [18].

Компенсация реактивной мощности.

В активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой для обеспечения ПКЭ по отклонению напряжения целесообразно применять FACTS технологии (рис. 3), способные выполнять полный функционал всех регулируемых средств компенсации реактивной мощности.

Данные электросетевые технологии являются перспективными и помимо положительного влияния на качество электрической энергии приводят к повышению динамической и статической устойчивости ЭЭС, нормализации параметров режимов работы ЭЭС, а также полному использованию пропускной способности действующих сетей⁴.

Особое внимание следует уделить FACTS устройствам второго поколения, которые обладают возможностью векторного регулирования, что подразумевает управление не только величиной, но и фазой вектора напряжения электрической сети. Базовым устройством второго поколения является СТАТКОМ, состоящий из преобразователя напряжения, выполненного на силовых транзисторах, который без дополнительных силовых реакторов и конденсаторных батарей способен обеспечить выработку и потребление реактивной мощности в пределах $\pm 100\%$. Электрическая схема СТАТКОМ приведена на рисунке 4. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к расширению масштабов практического применения данного технического устройства.

⁴ СТО 56947007 - 29.240.019-2009. Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России: стандарт организации. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.019-2009_FACTS.pdf. (дата обращения 12.04.2022г)

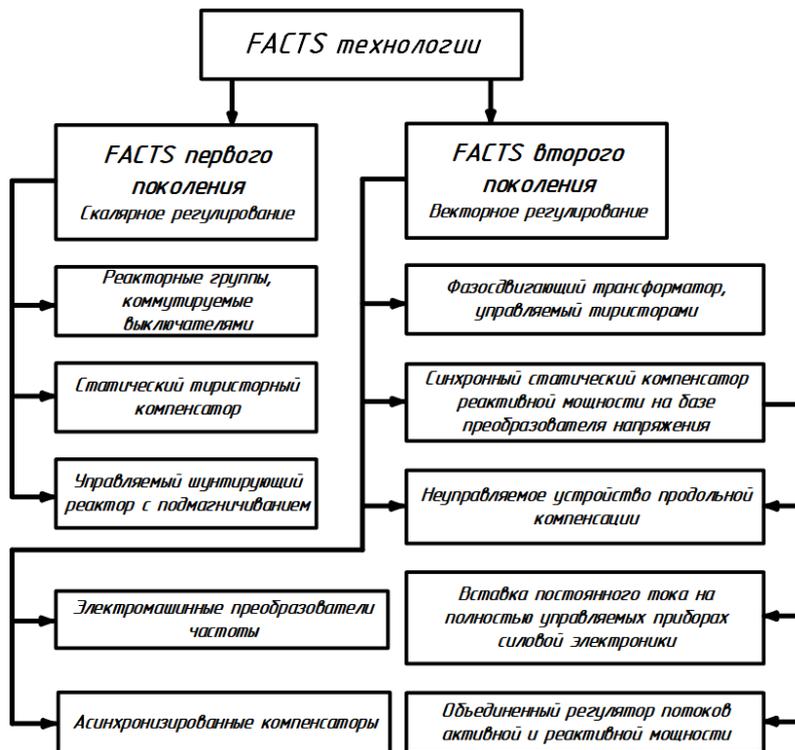


Рис. 3. Классификация устройств FACTS первого и второго поколения.

Fig. 3. Classification of FACTS devices of the first and second generation.

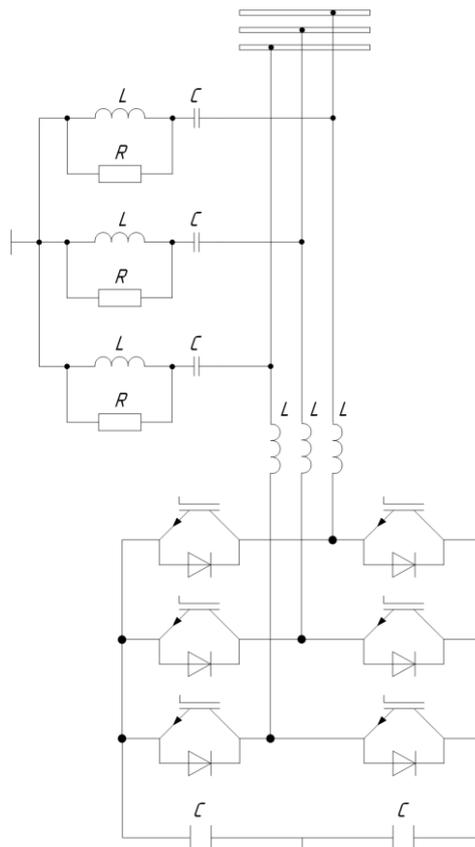


Рис. 4. Электрическая схема СТАТКОМ

Fig. 4. Electrical diagram of the STATCOM

Схемные решения.

Обеспечение ПКЭ в допустимых пределах по несимметрии в электрических сетях с тяговой нагрузкой является одной из важнейших проблем, так как тяга переменного тока создает существенную несимметрию в питающей трехфазной сети.

Классический подход к снижению несимметрии, подразумевающий применение трех типов тяговых подстанций по фазировке подключения трансформаторов, является недостаточно эффективным, что приводит к необходимости разработки и внедрения более действенных технических решений, направленных на улучшение качества электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой.

В настоящее время существуют схемы симметрирования двухфазной нагрузки путем формирования напряжений, отличающихся по фазе на 90° (схема Скотта), а также схемы на базе индуктивных и емкостных элементов (схема Штейнмеца) (рис. 5). Стоит отметить, что установки поперечной компенсации реактивной мощности также обладают симметрирующим эффектом, однако они не способны полностью убрать несимметрию, источником которой является тяга переменного тока [19].

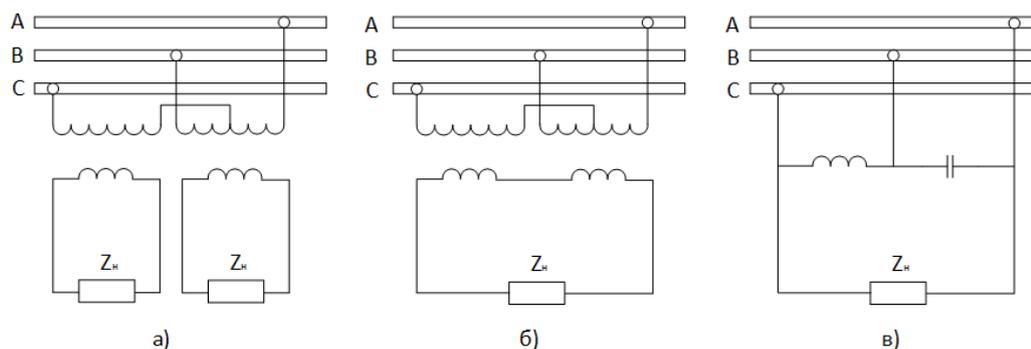


Рис. 5. Схемы симметрирования: а, б – схема Скотта, в – схема Штейнмеца. Fig. 5. Symmetry schemes: a, b – Scott scheme, c – Steinmetz scheme.

Большие перспективы применения имеют технические устройства на основе мощных полностью управляемых силовых *MOSFET* и *IGBT* транзисторов. Данные устройства могут осуществлять корректировку ПКЭ по несинусоидальности, несимметрии и отклонению напряжения, удерживая их значения в допустимых пределах. Важно отметить, что отдельные устройства подобного типа, сочетая в себе функционал нескольких технических средств для улучшения ПКЭ, способны комплексно влиять на качество электрической энергии [20].

Результаты и обсуждение

Задача улучшения качества электрической энергии в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой может быть успешно решена внедрением инновационных технологий, реализуемых на базе современных технических средств.

В работе определено, что возможность обеспечения ПКЭ в допустимых пределах в режиме реального времени может быть реализована внедрением управляемых сетевых элементов, системы мониторинга ПКЭ, а также системы управления качеством электроэнергии. Обоснована целесообразность применения средств управления параметрами режимов последнего поколения в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой. В отличие от существующих подходов показано, что входящие в систему мониторинга ПКЭ средства измерения должны поддерживать протоколы цифровой подстанции МЭК 61850, что позволит обеспечить возможность их применения в условиях внедрения перспективной технологии цифровой тяговой подстанции.

Предложено использовать РГ в сетях с тяговой нагрузкой. Применение РГ в целях повышения качества электроэнергии в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой позволит обеспечить корректировку уровней напряжения в узлах не только в допустимых пределах, но и в оптимальных. При этом негативное влияние на качество электроэнергии самой РГ может быть нивелировано путем применения современных технологий в области силовой электроники. Системный эффект от внедрения РГ возможно усилить при её использовании совместно с НЭ.

Технологии накопления электроэнергии являются важным компонентом концепции активно-адаптивных сетей. Внедрение НЭ в электрическую сеть с тягой переменного тока окажет положительное влияние на качество электрической энергии в части решения проблем провалов и выбросов напряжения, кратковременных прерываний, переходных перенапряжений, быстрых изменений напряжения.

При решении проблемы гармонических искажений в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой применение классических решений, таких как использование

силового резонансного фильтра, является нецелесообразным, т.к. будучи пассивными, данные устройства не способны эффективно корректировать ПКЭ по несинусоидальности в режиме реального времени в условиях постоянного изменения гармонического состава токов и напряжений. Современными техническими средствами, полностью соответствующими новым свойствам электрической сети с тяговой нагрузкой при их переходе на активно-адаптивную платформу, являются активные и гибридные фильтры, способные изменять собственные характеристики в зависимости от режима работы энергосистемы и тяги переменного тока, обеспечивая в режиме мониторинга ПКЭ в допустимых пределах по несинусоидальности.

При выборе технических средств, способных комплексно влиять на ПКЭ в адаптивном режиме, особое внимание стоит уделить СТАТКОМ. Данное оборудование обладает возможностью регулирования величины и фазы вектора напряжения электрической сети и относится к FACTS устройствам второго поколения. Современные устройства, реализуемые на базе СТАТКОМ, имеют возможность комплексно поддерживать ПКЭ в допустимых пределах по отклонению напряжения, частоте, колебанию напряжения, несинусоидальности и несимметрии (рис. 6).

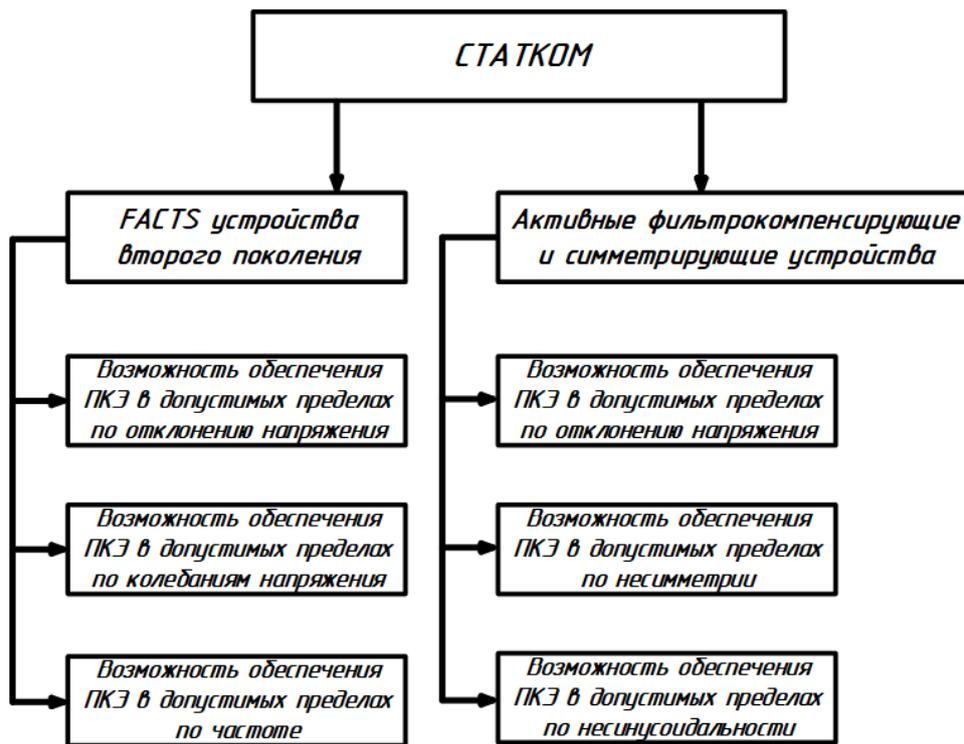


Рис. 6. Систематизация соответствия современных устройств, реализуемых на базе СТАТКОМ, решаемым проблемам в области качества электроэнергии.

Fig. 6. Systematization of compliance of modern devices implemented on the basis of STATCOM with solved problems in the field of electricity quality.

Важно отметить, что полученный от применения установок поперечной компенсации реактивной мощности симметрирующий эффект, обусловленный снижением потребляемого тягового тока, является недостаточным в электрических сетях с тяговой нагрузкой. Следовательно, для того, чтобы оказывать комплексное положительное влияние на качество электроэнергии в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой, необходимо использовать технические средства на базе СТАТКОМ совместно с современными схемами симметрирования нагрузки.

Исходя из вышесказанного, развитием решения проблемы качества электроэнергии в сетях с тяговой нагрузкой является перевод таких сетей на платформу активно-адаптивных сетей, применение в них РГ в сочетании с накопителями энергии, выбор технических средств и схемных решений, обеспечивающих поддержание качества электроэнергии в оптимальных пределах адаптивно изменениям схемно-режимной ситуации.

Заключение

При переходе электрических сетей с тяговой нагрузкой на активно-адаптивную

платформу в целях улучшения качества электроэнергии целесообразно применять технические средства, способные обеспечивать ПКЭ в допустимых пределах в режиме реального времени в зависимости от режимов работы энергосистемы и тяговой нагрузки.

В данной работе технические средства для улучшения ПКЭ впервые были проанализированы на предмет соответствия новым свойствам электрической сети с тягой переменного тока, возникающим при переходе данных сетей на активно-адаптивную платформу. К таким средствам относятся распределенная генерация, накопители электрической энергии, активные фильтрокомпенсирующие и симметрирующие устройства, *FACTS* технологии второго поколения. При этом стоит отметить целесообразность комбинирования данных технологий с целью получения новых свойств адаптивности электрической сети.

Классические подходы решения проблем с качеством электрической энергии, основанные на применении пассивных технических устройств, не соответствуют новым свойствам активно-адаптивных сетей с тягой переменного тока. В условиях перехода к новой концепции «умных» электрических сетей применение данных подходов является нецелесообразным.

Литература

1. Савина Н.В., Лисогурский И.А. Тяга переменного тока, как источник снижения эффективности и надежности функционирования электрических сетей // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 года, Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. С. 143-147.
2. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Черепанов А.В. Качество электроэнергии в высоковольтных электрических сетях, питающих тяговые подстанции Транссиба // Энергетическая политика. 2018. № 1. С. 86-95.
3. S. Hu, et al. A Power Factor-Oriented Railway Power Flow Controller for Power Quality Improvement in Electrical Railway Power System // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64, N2. pp. 1167-1177.
4. Pee-Chin Tan, R. E. Morrison, D. G. Holmes Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection // IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. Vol. 39, N2. pp. 575-581.
5. H. Liao, S. Abdelrahman, J. V. Milanović Zonal Mitigation of Power Quality Using FACTS Devices for Provision of Differentiated Quality of Electricity Supply in Networks With Renewable Generation // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32, N4, pp. 1975-1985.
6. Ginn H.L., Czarnecki L.S. An optimization based method for selection of resonant harmonic filter branch parameters // IEEE Trans. on Power Delivery. 2006. Vol. 21, N3. pp. 1445–1451.
7. Gary W. Chang, Hung-Lu Wang, Shou-Yung Chu. Strategic placement and sizing of passive filters in a power system for controlling voltage distortion // IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. Vol. 19, N3. pp. 1204–1211.
8. A. F. Zobaa and S. H. E. Abdel Aleem, A New Approach for Harmonic Distortion Minimization in Power Systems Supplying Nonlinear Loads // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014 Vol. 10, N2. pp. 1401-1412.
9. Крюков А.В., Черепанов А.В., Шафиков А.Р. Снижение гармонических искажений в высоковольтных сетях, питающих тяговые подстанции, на основе активных фильтров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 1(61). С. 36-46.
10. L. Liu, N. Dai, K. W. Lao, W. Hua A Co-Phase Traction Power Supply System Based on Asymmetric Three-Leg Hybrid Power Quality Conditioner // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69, N12. pp. 14645-14656.
11. Морозов П.В., Морозов Ю.В. Распределение мощности между обмотками тяговых трансформаторов на основе цифровой фильтрации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 6(149). С. 1136-1144.
12. Крюков А.В., Любченко И.А. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(6):53-65. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65>

13. Дикович В.В., Кац И.М., Стремиллова О.С. Выбор методов и средств снижения несимметрии напряжений в восточной части оэс сибери. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016;(9-10):66-72. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-9-10-66-72>
14. Арсентьев Г.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В. Применение энергетических роутеров в электротехнических комплексах железных дорог переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 10-15.
15. Савина Н.В., Лисогурский И.А., Лисогурская Л.Н. Применение технологий активно-адаптивных сетей для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2021. № 93. С. 56-61.
16. Федоров В.К., Леонов Е.Н., Федоров Д.В. Влияние распределенной генерации на потери и качество электрической энергии // Омский научный вестник. 2016. № 6(150). С. 72-76.
17. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 6-е изд. М., Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
18. Мустафа Г.М., Гусев С.И. Опыт использования активных фильтро-компенсирующих устройств шунтирующего и серийного типа в электрических сетях // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Москва, 05–07 декабря 2018 года, Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Центр полиграфических услуг» РАДУГА", 2018. С. 67-77.
19. Закарюкин, В.П., Крюков А.В., Иванова Е.С. Анализ схем симметрирования тяговых нагрузок железных дорог переменного тока // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4(20). С. 68-73.
20. Киселев, М.Г. Исследование и разработка методов симметрирования токов в трехфазных системах электроснабжения на основе силовых электронных устройств компенсации неактивной мощности: специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты: Москва; 2017. Доступно по: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01006654507?page=1&rotate=0&theme=white> Ссылка активна на 12 апреля 2022.

Авторы публикации

Савина Наталья Викторовна – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой энергетики, Амурский государственный университет», г. Благовещенск.

Лисогурский Иван Александрович – аспирант, Амурского государственного университета, г. Благовещенск.

Лисогурская Лидия Николаевна – аспирант, Амурского государственного университета, г. Благовещенск.

References

1. Savina NV, Lisogurskiy IA. *Tyaga peremennogo toka, kak istochnik snizheniya effektivnosti i nadezhnosti funkcionirovaniya elektricheskikh setei*. Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu: IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, Komsomolsk-on-Amur, Russia, 16–26 Feb 2021; Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-na-amure state university, 2021. pp.143-147. doi:10.17084/978-5-7765-1468-5_2021_143
2. Bulatov YuN, Kryukov AV, Cherepanov AV *Kachestvo elektroenergii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh, pitayushchikh tyagovye podstantsii Transsiba. Energeticheskaya politika*. 2018; 1:86-95. EDN: XORWEP
3. S. Hu, et al. *A Power Factor-Oriented Railway Power Flow Controller for Power Quality Improvement in Electrical Railway Power System*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017; 64(2):1167-1177. doi: 10.1109/TIE.2016.2615265.
4. Pee-Chin Tan, R.E. Morrison, D. G. Holmes *Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection*. IEEE Transactions on Industry Applications. 2003; 39(2):575-581. doi: 10.1109/TIA.2003.809455.

5. H. Liao, S. Abdelrahman, J. V. Milanović *Zonal Mitigation of Power Quality Using FACTS Devices for Provision of Differentiated Quality of Electricity Supply in Networks With Renewable Generation*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2017; 32(4):1975-1985. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2585882.
6. Ginn H.L., Czarnecki L.S. *An optimization based method for selection of resonant harmonic filter branch parameters*. IEEE Trans. on Power Delivery. 2006; 21(3):1445–1451.
7. Gary W. Chang, Hung-Lu Wang, Shou-Yung Chu. *Strategic placement and sizing of passive filters in a power system for controlling voltage distortion*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2004; 19(3):1204–1211.
8. A. F. Zobaa and S. H. E. Abdel Aleem, *A New Approach for Harmonic Distortion Minimization in Power Systems Supplying Nonlinear Loads*. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014; 2(10):1401-1412. doi: 10.1109/TII.2014.2307196.
9. Kryukov AV, Cherepanov AV, Shafikov AR Snizhenie garmonicheskikh iskazhenii v vysokovol'tnykh setyakh, pitayushchikh tyagovye podstantsii, na osnove aktivnykh fil'tro. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*. 2019; 61(1):36-46. doi: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).36-46. EDN: ZFBFFZ
10. L. Liu, N. Dai, K. W. Lao, W. Hua *A Co-Phase Traction Power Supply System Based on Asymmetric Three-Leg Hybrid Power Quality Conditioner*. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020; 69(12):14645-14656. doi: 10.1109/TVT.2020.3032939.
11. Morozov PV, Morozov YuV Raspreделение moshchnosti mezhdu obmotkami tyagovykh transformatorov na osnove tsifrovoi fil'tratsii. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019; 149(6):1136-1144. doi: 10.21285/1814-3520-2019-6-1136-1144. EDN: LJFCMP
12. Kryukov A.V., Lyubchenko I.A. Improving the quality of electricity supply systems in stationary objects of railway transport. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(6):53-65. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65>
13. Dikovich V.V., Katz E.M., Stremilova O.S. Selection of methods and tools of voltage unbalance reduction within the Eastern part of Siberian integrated power system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(9-10):66-72. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-9-10-66-72>
14. Arsent'ev GO, Arsent'ev OV, Kryukov AV Primenenie energeticheskikh routerov v elektrotekhnicheskikh kompleksakh zheleznykh dorog peremennogo toka. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2021; 50(1):10-15. doi: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-10-15. EDN: ELNTGF
15. Savina NV, Lisogurskii IA, Lisogurskaya LN Primenenie tekhnologii aktivno-adaptivnykh setei dlya upravleniya kachestvom elektroenergii v elektricheskikh setyakh s tyagovoi nagruzkoj. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki*. 2021; 93:56-61. doi: 10.22250/jasu.93.12.
16. Fedorov VK, Leonov EN, Fedorov DV Vliyanie raspredelennoi generatsii na poteri i kachestvo elektricheskoi energii. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2016; 150(6):72-76.
17. Zhezhenko IV. *Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyati*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p.
18. Mustafa GM, Gusev SI. *Opyt ispol'zovaniya aktivnykh fil'tro-kompensiruyushchikh ustroystv shuntiruyushchego i seriesnogo tipa v elektricheskikh setyakh*. Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 05–07 Dec 2018; Moskva: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu Tsentra poligraficheskikh uslug «RADUGA», 2018. pp. 67-77.
19. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Ivanova ES Analiz skhem simmetrirovaniya tyagovykh nagruzok zheleznykh dorog peremennogo toka. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2013; 20(4):68-73.
20. Kiselev, MG *Issledovanie i razrabotka metodov simmetrirovaniya tokov v trekhfaznykh sistemakh elektrosnabzheniya na osnove silovykh elektronnykh ustroystv kompensatsii neaktivnoi moshchnosti: spetsial'nost' 05.09.01 «Elektromekhanika i elektricheskie apparaty»: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk*. Moscow; 2017. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01006654507?page=1&rotate=0&theme=white> Accessed: 12 April 2022.

Authors of the publication

Natalya V. Savina – Amur State University, Blagoveshchensk, Russia.

© Н.В. Савина, И.А. Лисогурский, Л.Н. Лисогурская

Ivan A. Lisogurskiy – Amur State University, Blagoveshchensk, Russia.

Lydia N. Lisogurskaya – Amur State University, Blagoveshchensk, Russia.

Получено

02.05.2022г.

Отредактировано

16.05.2022г.

Принято

24.05.2022г.