

2. Волкова, И.О. Интеллектуальная энергетика в России: оценка существующего потенциала развития // ЭКО. – 2016. – № 12 (510). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnaya-energetika-v-rossii-otsenka-suschestvuyushchego-potentsiala-razvitiya>.

3. Зиганшин, А.Г., Михеев, Г.М. Цифровизация системы учета электроэнергии // Вестник ЧГУ. – 2020. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovizatsiya-sistemy-uchyota-elektroenergii>.

4. Логинов, А.Е., Логинов, Е.Л. Переход к интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивной сетью: глобализационное конструирование новых управленческих полей в единой энергетической системе России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2012. – № 33. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perehod-k-intellektualnoy-elektroenergeticheskoy-sisteme-s-aktivno-adaptivnoy-setyu-globalizatsionnoe-konstruirovaniye-novyh>.

5. Мусаев, Т.А., Камалиев, Р.Н., Федоров, О.В., Капанский, А.А. Использование интеллектуальных приборов учета электрической энергии в целях повышения эффективности процесса тарифообразования // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2020. – № 2 (81). URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-intellektualnyh-pribov-ucheta-elektricheskoy-energii-v-tselyah-povysheniya-effektivnosti-protsessa](https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-intellektualnyh-pribov-ucheta-elektricheskoy-energii-v-tselyah-povysheniya-effektivnosti-protsessa-tarifooobrazovaniya)

6. Ремизова, Т.С., Кошелев, Д.Б. Возможности создания и перспективы развития интеллектуальной системы учета электроэнергии в России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2018. – № 2 (359). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-sozdaniya-i-perspektivy-razvitiya-intellektualnoy-sistemy-ucheta-elektroenergii-v-rossii>.

7. Савина, Н.В., Вивдыч, А.С. Организация интеллектуального учета электроэнергии при функционировании розничных рынков электроэнергии // Вестник Амурского гос. ун-та. Серия: «Естественные и экономические науки». – 2018. – № 81. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-intellektualnogo-ucheta-elektroenergii-pri-funktsionirovanii-rozничных-rynkov-elektroenergii>.

8. Савина, Н.В., Мясоедов, Ю.В. Системные исследования потерь электроэнергии при функционировании распределительных электрических сетей // Вестник ИрГТУ. – 2012. – № 1 (60). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnye-issledovaniya-poter-elektroenergii-pri-funktsionirovanii-raspredelitelnyh-elektricheskikh-setey>.

9. Федеральный закон от 27.12.2018 № 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации».

10. Ховалова, Т.В., Жолнерчик, С.С. Эффекты внедрения интеллектуальных электроэнергетических сетей // СРРМ. – 2018. – № 2 (107). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effekty-vnedreniya-intellektualnyh-elektroenergeticheskikh-setey>

УДК 621.31

**Савина Наталья Викторовна**

Амурский государственный университет,

г. Благовещенск, Россия

e-mail: [nataly-savina@mail.ru](mailto:nataly-savina@mail.ru)

**Savina Natalia Viktorovna**

Amur State University,

Blagoveshchensk, Russia

e-mail: [nataly-savina@mail.ru](mailto:nataly-savina@mail.ru)

**Лисогурский Иван Александрович**

Амурский государственный университет,

г. Благовещенск, Россия

e-mail: [ivan\\_2404@mail.ru](mailto:ivan_2404@mail.ru)

**Lisogursky Ivan Alexandrovich**

Amur State University,

Blagoveshchensk, Russia

e-mail: [ivan\\_2404@mail.ru](mailto:ivan_2404@mail.ru)

**Лисогурская Лидия Николаевна**

Амурский государственный университет,

г. Благовещенск, Россия

e-mail: [kalinichenko-lid@mail.ru](mailto:kalinichenko-lid@mail.ru)

Lisogursky Lydia Nikolaevna  
Amur State University,  
Blagoveshchensk, Russia  
e-mail: [kalinichenko-lid@mail.ru](mailto:kalinichenko-lid@mail.ru)

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ СЕТЕЙ  
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ**

**APPLICATION OF ACTIVE-ADAPTIVE NETWORK TECHNOLOGIES FOR POWER QUALITY  
MANAGEMENT IN ELECTRIC NETWORKS WITH TRACTION LOAD**

*Аннотация. На основе системного подхода произведен анализ базовых технологий интеллектуальной электроэнергетической системы, обеспечивающих адаптивное управление электрической сетью. Показана целесообразность их применения для адаптивного управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой путем расширения функций. Предложены варианты их надстройки для улучшения качества электроэнергии и обеспечения оптимальных параметров показателей ее качества.*

*Abstract. On the basis of the system approach, the analysis of the basic technologies of the intelligent electric power system that provide adaptive management of the electric network is carried out. The expediency of their application for adaptive power quality management in electric networks with traction load by expanding the functions is shown. The variants of their configuration are proposed to improve the quality of electricity and ensure optimal parameters of electricity quality indicators.*

*Ключевые слова: активно-адаптивная сеть, тяга переменного тока, качество электроэнергии, технологии FACTS, активные фильтры гармоник.*

*Key words: active-adaptive network, AC traction, electricity quality, FACTS technologies, active harmonic filters.*

**DOI: 10.22250/jasu.93.12**

Низкое качество электрической энергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой, приводящее к снижению надежности и эффективности функционирования данных сетей, на сегодняшний день является актуальной проблемой, требующей решения. Приведение показателей качества электроэнергии к установленным нормам [7] осложняется тем, что тяга переменного тока является передвижным источником искажения качества электроэнергии в части несинусоидальности и несимметрии токов и напряжений, колебаний напряжения, электромагнитных помех.

Одним из возможных решений проблемы низкого качества электроэнергии в электрических сетях с тягой переменного тока может стать переход электрической сети с пассивными устройствами, улучшающими качество электроэнергии, к совокупности устройств, обеспечивающих изменение показателей качества электроэнергии и параметров электрической сети в реальном времени в зависимости от режимов работы тяги переменного тока и режимов энергосистемы.

Работа электрической сети с тяговой нагрузкой в адаптивном режиме не только улучшит качество электрической энергии, но и повысит эффективность и надежность функционирования данных сетей. Поддержание показателей качества электроэнергии в адаптивном режиме в оптимальных пределах, не выходящих за границы, установленные [7], обеспечит снижение потерь электроэнергии в элементах электрической сети, увеличение срока службы оборудования, увеличение точности учета

электроэнергии, уменьшение эксплуатационных издержек и рост экономических показателей работы электросетевого комплекса в целом.

Улучшение качества электрической энергии положительно скажется на надежности электрических сетей, питающих тягу переменного тока. Произойдет снижение доли внезапных и постепенных отказов, увеличение времени безотказной работы, снизится ущерб от недоотпуска электроэнергии другим потребителям.

Цель статьи – выявление и анализ технических устройств, которые позволят электрической сети с тягой переменного тока оперативно реагировать на любые изменения режима источников искажения качества электроэнергии и вносить оптимальное управляющее воздействие.

Для этого необходимо:

- 1) выбрать базовые технологии, обеспечивающие адаптивное управление электрической сетью;
- 2) проанализировать возможности технических средств, реализующих выбранные технологии, к адаптивному управлению качеством электроэнергии;
- 3) предложить пути их надстройки для улучшения качества электроэнергии и обеспечения оптимальных параметров показателей качества электроэнергии.

Чтобы сделать электрическую сеть адаптивной, необходимо внедрение следующих элементов электрических сетей и систем управления: линий электропередачи с управляемым изменением активных и реактивных составляющих сопротивлений, оборудованных системой контроля их состояния; устройств электромагнитного преобразования электроэнергии с широкими возможностями регулирования параметров; средств накопления и аккумуляции энергии; коммутационных аппаратов, имеющих большой коммутационный ресурс и высокую отключающую способность; исполнительных механизмов, которые позволяют воздействовать на активные элементы сети в реальном времени, изменяя ее параметры и топологию; датчиков положения и текущих режимных параметров в количестве, достаточном для обеспечения оценки состояния сети в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы энергосистемы, имеющих высокую скорость снятия показаний в цифровом виде; современных цифровых устройств релейной защиты и автоматики; информационно-технологических и управляющих систем, в том числе программного обеспечения и технических средств адаптивного управления с возможностью воздействия в реальном времени на активные элементы сети и электроустановки потребителей; быстродействующей многоуровневой управляющей системы с соответствующим информационным обменом для управления и контроля состояния системы в целом, ее частей и элементов с различными временными циклами для разных уровней управления [1]. Все перечисленные компоненты составляют базовые технологии адаптивного управления электрической сетью в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС). На основе системного подхода определено, что часть из них можно использовать для оптимального управления качеством электроэнергии.

Проанализируем возможности выявленных в результате системного анализа компонентов активно-адаптивной сети, предложенных в [1,2], для управления качеством электроэнергии в режиме реального времени.

*Технология автоматического мониторинга режимов электрической сети.* Система мониторинга, помимо датчиков положения и текущих режимных параметров, должна быть снабжена устройствами для измерения показателей качества электрической энергии, поддерживающими стандартные протоколы передачи данных. Система позволит в реальном времени получать полную информацию о текущем состоянии качества электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой для дальнейшего принятия решений.

*FACTS технологии*, применяемые с целью повышения управляемости электрической сети, позволяют поддерживать качество электрической энергии по напряжению в допустимых пределах, обеспечивая заданные уровни напряжения в необходимых точках электрической сети. Применение в электрических сетях с тягой переменного тока пофазно управляемых источников реактивной мощности, выполненных по технологиям FACTS, помимо стабилизации уровней напряжения, обеспечит снижение несимметрии в питающих сетях, а также в сетях районов электроснабжения нетяговых потребителей [4].

*Распределенная генерация*, являясь компонентом активно-адаптивной сети, может быть интегрирована в электрическую сеть с тяговой нагрузкой. Источники распределенной генерации могут быть подключены к шинам тяговых подстанций напряжением 10 кВ для питания потребителей, а также к шинам 0,4 кВ для дополнительного резервного питания устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Включение распределенной генерации в сеть с тяговой нагрузкой позволит регулировать напряжение в сети в реальном времени и, следовательно, обеспечит отклонение напряжения не только в допустимых, но и в оптимальных пределах. Такое применение распределенной генерации ранее не рассматривалось.

Влияние распределенной генерации на качество электрической энергии неоднозначно. Применение данной технологии позволяет снизить величины отрицательных и положительных отклонений напряжения, дозу кратковременного и длительного фликера, оказывая положительное влияние на качество электрической энергии. Но в то же время распределенная генерация в большинстве случаев является источником высших гармоник. Однако данную проблему можно решить с применением современных передовых технологий силовой электроники.

*Технология аккумулярования электроэнергии*. Накопители электрической энергии обеспечивают возможность эффективной реализации потенциала новых видов распределенной генерации, приводят к созданию активных потребителей, повышают эффективность использования энергетических мощностей и работы энергосистем в целом.

Применение накопителей электрической энергии, как неотъемлемой части ИЭС ААС, позволяет эффективно решать ряд проблем качества электроэнергии, – таких, как провалы и выбросы напряжения, колебание нагрузки, приводящее к колебаниям напряжения, отклонение частоты; снижает ущербы, связанные со снижением надежности электроснабжения, обусловленным низким качеством электроэнергии [9]. Тяга переменного тока может выполнять функции накопителя электроэнергии.

Рассмотрим возможности технических средств, реализующих выбранные технологии, по адаптивному управлению качеством электроэнергии и целесообразность их надстройки.

Являясь одной из наиболее перспективных электросетевых технологий, FACTS преобразует электрическую сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей. Это позволяет в режиме реального времени управлять значением пропускной способности линии электропередачи, перераспределять между параллельными линиями электропередачи потоки активной мощности, оптимизируя их в установившихся режимах и перенаправлять их по сохранившимся после аварий линиям электропередачи, не опасаясь нарушения устойчивости и тем самым обеспечивая повышение надежности электроснабжения потребителей, регулировать напряжение в узлах путем управления реактивной мощностью.

К устройствам FACTS первого поколения (FACTS -1) относят устройства, которые обеспечивают регулирование напряжения (реактивной мощности), а также требуемую степень компенсации реактивной мощности в электрических сетях (статический компенсатор реактивной мощности, реактор с тиристорным управлением, стационарный последовательный конденсатор с тиристорным управлением, фазосдвигающий трансформатор и др.).

К новейшим FACTS второго поколения (FACTS-2) относят устройства, которые обеспечивают регулирование режимных параметров на базе полностью управляемых приборов силовой элект-

троники (IGBT-транзисторы, IGCT-тиристоры и др.). FACTS-2 обладают новым качеством регулирования – векторным, когда регулируется не только величина, но и фаза вектора напряжения электрической сети (синхронный статический компенсатор (СТАТКОМ), объединенный регулятор потоков мощности (ОРПМ) и др.) [2].

Статические тиристорные компенсаторы (СТК) являются эффективным, экономически выгодным средством для адаптивного снижения колебаний напряжения при быстро изменяющейся нагрузке. Данные устройства работают как на выдачу, так и на потребление реактивной мощности, осуществляя ее плавное регулирование в широких пределах. Однако использование тиристорных ключей в данном оборудовании приводит к возникновению высших гармоник, что требует дополнительного использования фильтров гармоник. Стоит отметить также низкую эффективность применения СТК в слабых сетях.

Статический компенсатор реактивной мощности (СТАТКОМ) предназначен для регулирования реактивной мощности и обладает высоким быстродействием. Эффективное применение этого аппарата возможно в любых электрических сетях. Использование его позволяет не только регулировать напряжение, но и увеличивать пропускную способность сети, оптимизировать потоки мощности, улучшать форму кривой напряжения и т.п.

Как и СТК, СТАТКОМ генерирует высшие гармоники. Несмотря на их сравнительно меньший, чем у статических тиристорных компенсаторов, объем, в целях улучшения качества электроэнергии совместно с установкой СТАТКОМ необходимо предусматривать установку устройств, предназначенных для снижения гармонических искажений токов и напряжений.

С целью снижения гармонических искажений в электрических сетях с тяговой нагрузкой следует применять фильтро-компенсирующие устройства, включая их в состав системы управления качеством электроэнергии, предназначенной для обеспечения всех параметров качества в оптимальных пределах в реальном времени.

Пассивные фильтры гармоник изготавливаются по традиционным технологиям и являются простым и экономичным решением. Помимо фильтрации высших гармоник, они могут осуществлять компенсацию реактивной мощности основной гармоники. Пассивные фильтры гармоник относятся к статическим устройствам, это их существенный недостаток. При изменении гармонического состава токов и напряжений, а также при изменении параметров сети происходит значительное снижение эффективности данных устройств. Другой недостаток – возможность возникновения резонанса токов в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и индуктивностью питающей сети, на частотах, близких к частотам высших гармоник. Альтернативой пассивным устройствам являются активные фильтры гармоник [6].

В настоящее время промышленностью выпускаются активные фильтры гармоник, способные в зависимости от режима работы сети и характеристик нагрузки в реальном времени изменять свои характеристики. Данные устройства компенсируют высшие гармоники тока нагрузки, генерируя равные им по амплитуде, но противоположные по фазе токи.

Внедрение активных фильтров гармоник в электрические сети с тяговой нагрузкой позволит в адаптивном режиме держать в установленных нормах показатели качества электроэнергии, относящиеся к гармоническим составляющим напряжения, в том числе и искажения, вносимые активными устройствами интеллектуальной или активно-адаптивной сети.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что в концепции интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью присутствует широкий спектр технических устройств и систем управления, которые целесообразно применять для адаптивного управления качеством электроэнергии. Однако стоит учитывать, что данные технические средства могут неоднозначно влиять на качество электрической энергии. Оказывая положительный эффект на одни показа-

тели, они могут быть источниками искажения других. В связи с этим для улучшения качества электроэнергии и обеспечения оптимальных параметров показателей ее качества необходимо применять такие устройства не только в их исходном виде, но и с дополнительными надстройками, что позволит нивелировать как собственное негативное влияние, так и влияние тяги переменного тока, включая их в систему управления качеством электроэнергии.

1. Россети ФСК ЕЭС. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. – URL: [https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies\\_aas.pdf](https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf).
2. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. Редакция 5.0. – URL: <https://publications.hse.ru/mirror/pubs/share/folder/mfl4voxwok/direct/73743691>.
3. Савина, Н.В. Качество электроэнергии: учебное пособие. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. – 182 с.
4. Закарюкин, В.П. Управление качеством электроэнергии в системах тягового электроснабжения на основе технологий интеллектуальных сетей / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.В. Черепанов // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 65-75.
5. СТО 56947007 - 29.240.019-2009. Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России: стандарт организации. – М.: Изд-во ПАО «ФСК ЕЭС», 2009. – 34 с.
6. Довгун, В.П. Компенсационные характеристики гибридных фильтров гармоник / В.П. Довгун, С.А. Термбаев, Д.Э. Егоров, Е.С. Шевченко // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2012. – № 11-12. – С. 72-80.
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: введ. 01.07.2014. – М.: Стандартинформ, 2014 – 16 с.
8. Федоров, В.К. Влияние распределенной генерации на потери и качество электрической энергии / В.К. Федоров, Е.Н. Леонов, Д.В. Федоров // ОНВ. – 2016. – № 6 (150). – С. 72-76.
9. Савина, Н.В. Накопители электрической энергии как средство повышения надежности и экономичности функционирования электрической сети / Н.В. Савина, Л.Н. Лисогурская, И.А. Лисогурский // МНИЖ. – 2020. – №2-1 (92). – С. 63-70.

УДК 621.31

**Савина Наталья Викторовна**

Амурский государственный университет,

г. Благовещенск, Россия

e-mail: [nataly-savina@mail.ru](mailto:nataly-savina@mail.ru)

**Savina Natalia Viktorovna**

Amur State University,

Blagoveshchensk, Russia

e-mail: [nataly-savina@mail.ru](mailto:nataly-savina@mail.ru)

**Мясоедов Юрий Викторович**

Амурский государственный университет,

г. Благовещенск, Россия

e-mail: [myv@amursu.ru](mailto:myv@amursu.ru)

**Myasoedov Yuri Viktorovich**

Amur State University,

Blagoveshchensk, Russia

e-mail: [myv@amursu.ru](mailto:myv@amursu.ru)

**Мясоедова Лариса Анатольевна**

Амурский государственный университет,

г. Благовещенск, Россия

e-mail: [lo.myasoedova@gmail.com](mailto:lo.myasoedova@gmail.com)