

На правах рукописи



Рогов Григорий Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ,
ПИТАЮЩИХ ТЯГОВУЮ НАГРУЗКУ**

Специальность 05.14.02 –
Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Новосибирск - 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

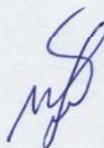
- Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Долгов Александр Павлович
- Официальные оппоненты - Манусов Вадим Зиновьевич,
доктор технических наук, профессор,
Новосибирский государственный
технический университет, профессор
кафедры «Системы электроснабжения
предприятий»
- Медведков Виталий Васильевич
кандидат технических наук, доцент,
Петербургский энергетический институт
повышения квалификации
(Новосибирский филиал), заведующий
кафедрой «Эксплуатации и наладки
электрооборудования»
- Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Иркутский государственный
университет путей сообщения»

Защита состоится «19» декабря 2013 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «18» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



И.П. Тимофеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие рыночных отношений в энергетике вынуждает относиться к электроэнергии не только как к физической сущности, но и как к товару, который должен обладать определенным качеством, чтобы соответствовать требованиям рынка. Под качеством электрической энергии (КЭ) понимается степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ. Низкое КЭ ухудшает условия работы электрических сетей и систем и приводит к значительному ущербу на всех уровнях от генерации до потребления.

Наиболее эффективным способом повышения КЭ является подавление искажений в месте их возникновения. На низком и среднем напряжении используются средства, повышающие коэффициент мощности, уменьшающие несимметрию и несинусоидальность токов нагрузки. В сетях высокого напряжения показатели КЭ, как правило, не хуже допустимых значений по ГОСТ Р 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Тем не менее, на напряжении 110 и 220 кВ имеются целые районы с низким КЭ. Для таких районов характерно наличие протяженных электрифицированных железных дорог, питающихся через трансформаторы от сети высокого напряжения. Так, проведенные в 2010 г замеры свидетельствуют, что в сетях 220 кВ, питающих тяговые транзиты Забайкальской железной дороги и Байкало-Амурской магистрали, на большинстве подстанций не соответствуют требованиям ГОСТ такие показатели КЭ, как суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, а также отмечаются значительные отклонения напряжения от номинального значения.

Для снижения уровней высших гармоник традиционно применяются пассивные фильтры, которые эффективны, главным образом, для компенсации гармонических искажений, создаваемых стационарными потребителями с практически неизменным режимом работы. Область целесообразного использования пассивных фильтров ограничивается их недостатками, основными из которых являются неполная компенсация токов высших гармоник, возможность образования неблагоприятных резонансных контуров, неуправляемая компенсация реактивной мощности. Этих недостатков лишены активные фильтры гармоник, появившиеся благодаря последним достижениям силовой электроники. Разработаны также способы симметрирования токов нагрузки, основанные на применении преобразователей напряжения либо управляемых или неуправляемых проводимостей, подключаемых параллельно нагрузке.

Существенный вклад в изучение вопросов качества электроэнергии и его повышения, улучшения режимов работы электроэнергетических систем внесли

В.А. Веников, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, С.Б. Лосев, М.Ш. Мисриханов, В.В. Никифоров, А.А. Рагозин, С.С. Смирнов, Н. Akagi, J. Dixon, L. Jih-Sheng, L. Moran.

Разработки указанных авторов позволили создать эффективные способы повышения КЭ, успешно применяемые в радиальных сетях низкого и среднего напряжения. Однако использование таких способов в высоковольтных электрических сетях, питающих тяговую нагрузку, затруднено или невозможно по техническим и организационным причинам. В России тяговые сети, как правило, имеют множество точек присоединения к сети высокого напряжения общего назначения. Применение известных способов повышения КЭ в таких сетях связано с необходимостью установки соответствующих технических средств на каждой тяговой подстанции. Требуется разработка специальных способов повышения КЭ в высоковольтных электрических сетях, питающих тяговую нагрузку, позволяющих сократить количество устройств, необходимых для обеспечения надлежащего КЭ.

Цель диссертационной работы заключается в исследовании целесообразности и эффективности комплексного повышения КЭ в электрических сетях, питающих тяговую нагрузку, разработке принципиальных предложений по комплексному воздействию на основные показатели КЭ.

Для достижения сформулированной цели решены следующие **задачи**:

1. Проанализированы особенности тяговой нагрузки и схемы ее электроснабжения, обуславливающие низкое КЭ в питающей сети высокого напряжения.

2. Предложен способ комплексного повышения КЭ, эффективный в высоковольтных электрических сетях, питающих тяговую нагрузку. Предложена структурная схема устройства, реализующего указанный способ, и система управления им.

3. Создана цифровая модель и разработан алгоритм управления устройством комплексного повышения КЭ.

4. Разработаны алгоритмы расчета установившихся режимов электроэнергетических систем, содержащих устройства комплексного повышения КЭ.

5. Исследовано влияние устройств комплексного повышения КЭ на амплитуду, симметрию и гармонический состав напряжения на примере системы электроснабжения Байкало-Амурской магистрали. Предложены места размещения устройств, оценена их необходимая мощность.

Объект исследований. Высоковольтная электрическая сеть, питающая тяговую нагрузку переменного тока.

Предмет исследований. Качество электроэнергии, способы и средства его повышения.

Методы исследований:

- методы теории электрических цепей;
- методы теории автоматического управления;

- методы математического моделирования режимов электроэнергетических систем и силовых преобразовательных установок;
- имитационное моделирование;

Для проведения вычислительных экспериментов использовались пакет «SimPowerSystems» системы «MATLAB» и комплекс программ «FAZONORD-качество», разработанный в Иркутском государственном университете путей сообщения.

Научную новизну составляют следующие положения, выносимые на защиту:

1. Предложен способ повышения КЭ, отличающийся воздействием непосредственно на амплитуду, симметрию и гармонический состав напряжения в питающей сети высокого напряжения.

2. Разработан алгоритм управления устройством комплексного повышения КЭ, заключающийся в представлении напряжения в точке подключения устройства к сети в виде набора регулируемых величин и выработке в замкнутой системе регулирования соответствующего набора управляющих воздействий, приводящих к установлению и поддержанию на выводах преобразователя напряжения такого напряжения, при котором напряжение в точке подключения представляет собой симметричную систему синусоидальных напряжений заданной амплитуды.

3. Предложены алгоритмы расчета установившихся режимов электроэнергетических систем, позволяющие учесть влияние устройств, улучшающих симметрию и гармонический состав напряжения в некотором узле.

Практическая значимость полученных научных результатов состоит в решении актуальных научно-технических задач, связанных с повышением КЭ в электроэнергетических системах (ЭЭС). Результаты работы служат теоретической основой для создания устройства централизованного повышения КЭ, применение которого может быть целесообразно в сложных ЭЭС с множеством искажающих нагрузок. Полученные результаты позволяют решать актуальную практическую задачу расчета установившихся несимметричных несинусоидальных режимов ЭЭС с учетом действия средств повышения КЭ.

Реализация результатов работы. Отдельные результаты исследования вошли в отчет по научно-исследовательской работе «Выбор пилотного проекта МЭС Сибири с использованием элементов ААС», выполненной Филиалом ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» - СибНИИЭ. Полученные результаты могут стать основой для проведения мероприятий, направленных на комплексное повышение КЭ в системах электроснабжения железных дорог Восточной Сибири.

Достоверность результатов работы основывается на:

- корректном применении положений теории электрических цепей;

- корректном использовании математического аппарата и промышленных инструментальных средств;
- проведении вычислительных экспериментов, подтверждающих справедливость теоретических положений;
- малом отличии результатов расчетов и результатов натурных замеров в системе электроснабжения Байкало-Амурской магистрали.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной молодежной научно-технической конференции «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах», г. Новосибирск, 2011 г., конференции «Релейная защита и противоаварийная автоматика. Перспективы развития», г. Кемерово, 2011 г., научных семинарах кафедр Автоматизированных электроэнергетических систем и Промышленной электроники НГТУ, днях науки НГТУ.

Личный вклад. Постановка научно-исследовательских задач и их решение, разработка положений, выносимых на защиту, основные выводы и результаты диссертации принадлежат автору.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 6 печатных работ, в том числе 3 научные статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ, 3 работы, опубликованные в сборниках международных и всероссийских конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Библиографический список содержит 68 наименований. Основное содержание диссертации изложено на 120 страницах, содержит 8 таблиц и иллюстрируется 56 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, определены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе рассмотрены особенности функционирования высоковольтных электрических сетей переменного тока, питающих тяговую нагрузку, охарактеризовано состояние КЭ в таких сетях, рассмотрены существующие средства повышения КЭ.

Тяговая нагрузка обладает рядом особенностей, обуславливающих низкое КЭ в питающей ее сети. Перемещение электровозов в пространстве и изменение потребляемой ими мощности приводит к резким и значительным отклонениям напряжения на шинах тяговых подстанций от номинального значения. Электровозы являются однофазными электроприемниками, и их питание от трехфазной сети вызывает несимметрию токов и напряжений. Наконец, двигатели постоянного тока электровозов питаются от сети переменного тока через выпрямители, работа которых приводит к появлению

токов высших гармоник и, как следствие, искажению формы кривой напряжения в сети. В России протяженные электрифицированные железные дороги получают питание от той же сети, что и населенные пункты и промышленные предприятия, расположенные вблизи железной дороги. Особенности тяговой нагрузки ухудшают КЭ в общей сети и осложняют работу нетяговых потребителей.

Низкое КЭ приводит к значительному ущербу, связанному с повышением потерь активной мощности, снижением срока службы электрооборудования, необходимостью увеличения количества или номинальных параметров электрооборудования, возможностью ошибочной работы релейной защиты и автоматики.

Для регулирования амплитуды напряжения в ЭЭС применяются средства компенсации реактивной мощности (СКРМ). Использование неуправляемых СКРМ (шунтирующие реакторы, батареи конденсаторов) в системах электроснабжения железных дорог затруднено из-за резкопеременного характера тяговой нагрузки. Целесообразно применение управляемых СКРМ (синхронные компенсаторы, управляемые шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы, СТАТКОМ). При реализации пофазного управления такие СКРМ способны также улучшать симметрию напряжений в ЭЭС.

Для борьбы с высшими гармониками традиционно применяются пассивные фильтры (также распространено название фильтро-компенсирующие устройства). Повышение КЭ в сложных сетях, к которым относятся сети, питающие тяговую нагрузку, с помощью пассивных фильтров затруднительно. Это обусловлено:

- возможностью резкого возрастания напряжений некоторых гармоник в отдельных узлах из-за резонансных явлений, возникающих между индуктивно-емкостными цепями пассивных фильтров и реактивными элементами сети;
- изменением оптимального набора пассивных фильтров при изменении схемно-режимной ситуации, связанным с неспособностью пассивных фильтров регулировать свои параметры;
- повышением напряжения в сети при установке большого количества пассивных фильтров.

Современные достижения силовой электроники позволили создать активные фильтры гармоник (АФГ), лишенные многих недостатков пассивных фильтров. Основным элементом АФГ является преобразователь напряжения (ПН). АФГ способны не только улучшать форму кривой, но и симметрировать и регулировать амплитуду тока или напряжения. Поперечные АФГ подключаются параллельно искажающей нагрузке и создают такой несимметричный несинусоидальный ток i_A , который в сумме с током нагрузки i_H дает симметричный синусоидальный ток в ветви источника i_H (рисунок 1 а). Продольные АФГ подключаются последовательно между источником (сетью) и нагрузкой через последовательный трансформатор (рисунок 1 б) и

предназначены для защиты нагрузки от искажений, существующих в сети. Продольные АФГ создают несимметричную несинусоидальную добавку напряжения u_A , которая в сумме с напряжением источника $u_{И}$ дает симметричное синусоидальное напряжение на шинах нагрузки $u_{Н}$.



Рисунок 1 - Подключение АФГ: а) поперечного; б) продольного

АФГ хорошо проявляют свои возможности в радиальных схемах и уже нашли широкое применение в сетях низкого и среднего напряжения. Использование АФГ может быть неприемлемо в разветвленных высоковольтных сетях с множеством искажающих нагрузок, к каким относятся сети, питающие тяговую нагрузку. Для требуемого повышения КЭ необходима установка АФГ на каждой тяговой подстанции. Такое решение предполагает значительные капитальные вложения. Препятствия могут создавать также организационные сложности, связанные с принадлежностью тяговых подстанций. Разные собственники могут иметь несовпадающее видение проблемы и отсутствие интереса в ее решении.

Таким образом, особенности тяговой нагрузки и схем ее электроснабжения формируют условия, отличные от тех, для которых разработаны существующие средства и способы подавления высших гармоник.

Вторая глава посвящена разработке способа повышения КЭ, эффективного в высоковольтных электрических сетях, питающих тяговую нагрузку. Такой способ должен обеспечивать возможность при установке малого числа устройств существенно улучшать амплитуду, симметрию и гармонический состав напряжения во всей сети.

Для реализации указанного способа может применяться устройство на основе силового ПН. Подобные устройства долгое время используются в автономных системах электроснабжения малой мощности на транспортных средствах (самолетах, кораблях). В электроэнергетике в сетях низкого и среднего напряжения применяются устройства активной фильтрации токов. Предлагаемое устройство комплексного повышения КЭ, названное активным кондиционером напряжения (АКН), конструктивно может повторять известные устройства. Различие заключается в алгоритмах управления.

Силовая цепь АКН содержит конденсаторы, в которых накапливается энергия, выступающие в роли источника напряжения, ПН на полностью управляемых вентилях с высокой частотой коммутации, служащий для управления напряжением источника, и трансформатор, необходимый для

подключения ПН к сети высокого напряжения (рисунок 2). Регулирование напряжения на выводах ПН при неизменном напряжении на конденсаторах может осуществляться за счет изменения времени за период, в течение которого каждый ventиль находится в проводящем состоянии. При независимом выборе моментов коммутации вентилях разных фаз возможно создание на выводах ПН несимметричного напряжения. Использование широтно-импульсной модуляции дает возможность создавать напряжение заданного гармонического состава.

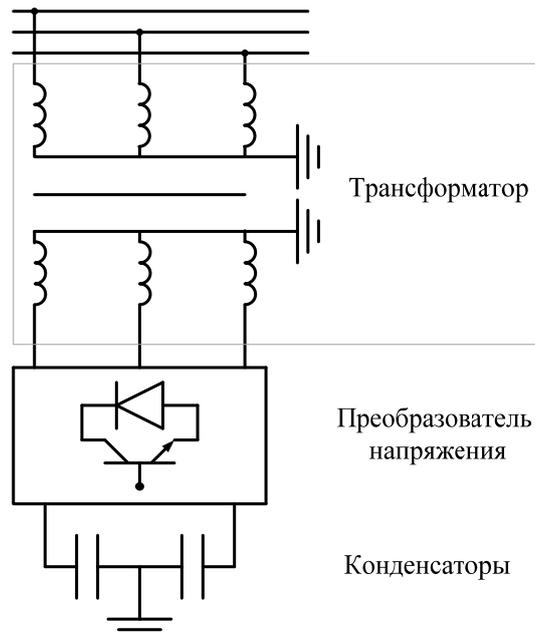


Рисунок 2 - Принципиальная схема АКН

Основная идея управления АКН заключается в создании на выводах ПН такого напряжения, при котором напряжение в точке подключения АКН к сети является симметричным, синусоидальным и имеет желаемую амплитуду. Напряжение на выводах ПН при этом в общем случае несимметрично и содержит высшие гармоники. Из-за протекания в сети несимметричных несинусоидальных токов, вызывающих несимметричное несинусоидальное падение напряжения, напряжение в отдаленных точках электрической сети будет отличаться от идеального по амплитуде, симметрии и гармоническому составу. Тем не менее установка одного АКН может улучшить показатели КЭ во всей сети. Можно ожидать, что КЭ в некоторой точке сети будет тем лучше, чем ближе электрически эта точка находится к АКН.

Предложено несколько алгоритмов управления АКН. Наиболее простой заключается в следующем. В каждой фазе измеряется напряжение в точке подключения АКН к сети и представляется в виде набора сигналов $u_1^{(v)}$ (рисунок 3), соответствующих амплитудам и фазам отдельных гармоник. Каждый из полученных сигналов сравнивается с уставкой $u_0^{(v)}$, соответствующей желаемому значению амплитуды и фазы напряжения данной гармоники. Для высших гармоник уставки равны нулю. Для первой гармоники

задается набор уставок, соответствующий симметричной системе напряжений желаемой амплитуды, причем фазные углы напряжений первой гармоники задаются регулятором, действующим по принципу стабилизации напряжения на конденсаторах. В таком режиме активная мощность в цепи АКН равна потерям в его элементах. В результате сравнения сигналов с уставками формируются сигналы ошибок $u_2^{(v)}$, прибавление которых к текущим сигналам напряжения дает сигналы напряжения, которое должно быть создано на выводах ПН для получения в точке подключения напряжения более близкого к желаемому. Из полученных сигналов для отдельных гармоник восстанавливается сигнал результирующего напряжения u_3 . Этот сигнал направляется в широтно-импульсный модулятор, в котором формируются команды на коммутацию вентилялей.

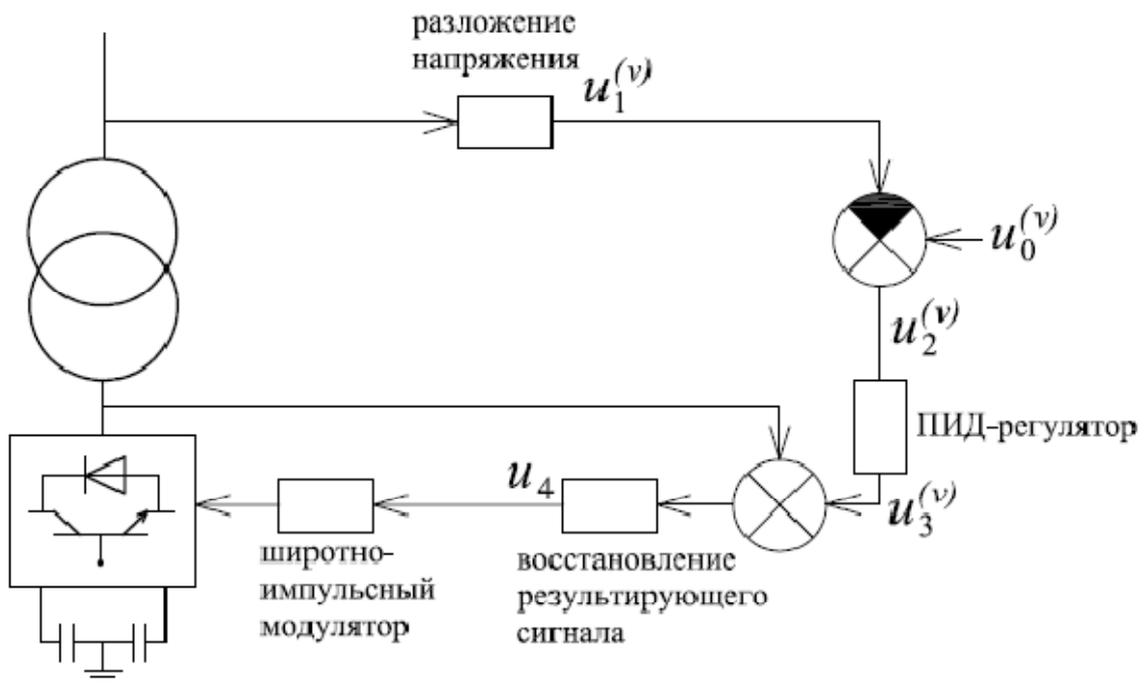


Рисунок 3 - Структурная схема системы управления АКН

Для проверки эффективности предложенного способа повышения КЭ и алгоритма управления АКН в приложении Simulink программного комплекса MATLAB создана модель ЭЭС с АКН. В модели по обе стороны от АКН расположены фрагменты схемы в составе симметричная ЭДС – симметричное сопротивление – несимметричная проводимость и несимметричные источники токов высших гармоник – симметричное сопротивление (рисунок 4). Реализовано скачкообразное изменение параметров системы путем коммутации дополнительного сопротивления параллельно с существующим.

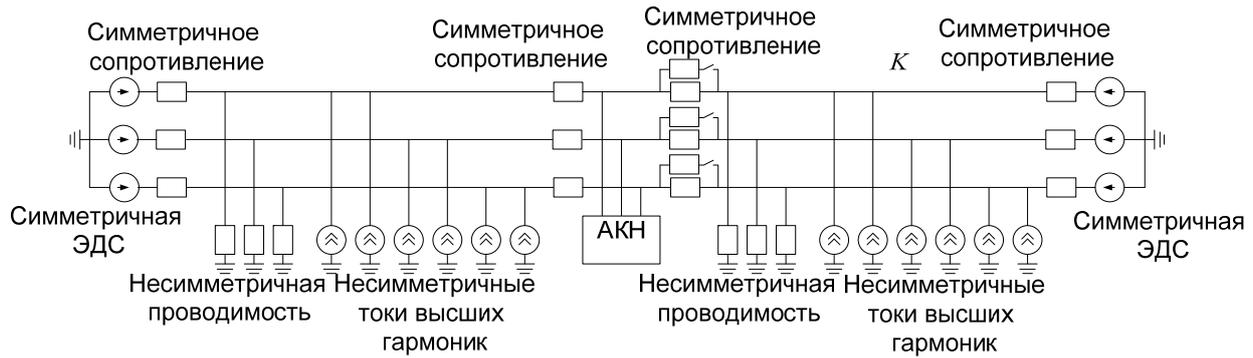


Рисунок 4 – Модель ЭЭС с АКН

На описанной модели реализован режим, характеризующийся высокой степенью несимметрии и несинусоидальности напряжения. Результаты моделирования показаны на рисунке 5. АКН включается в момент времени 0,2 с, до этого можно наблюдать исходный режим. В момент 0,4 с происходит резкое изменение режима системы. АКН быстро улучшает амплитуду, симметрию и гармонический состав напряжения после подключения и изменения режима.

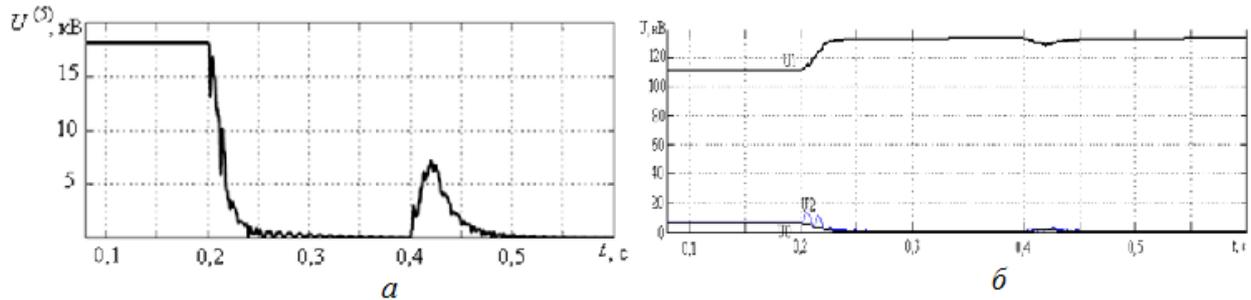


Рисунок 5 - Изменение напряжения в точке подключения АКН: а) действующее значение напряжения пятой гармоники; б) напряжение прямой, обратной и нулевой последовательности

Третья глава посвящена разработке алгоритмов расчета установившихся режимов ЭЭС, содержащих АКН. При расчетах установившихся режимов ЭЭС в большинстве случаев режим полагают симметричным. Применительно к электрическим сетям, питающим тяговую нагрузку, такое допущение неприемлемо вследствие высоких коэффициентов несимметрии, отмечающихся в таких сетях. Существуют методы расчета несимметричных режимов, однако нет алгоритмов, позволяющих учитывать в таких расчетах специальные средства симметрирования напряжения.

Расчет режима ЭЭС с большим количеством несимметрий, к каким относятся ЭЭС с высокой долей тяговой нагрузки, целесообразно осуществлять в фазных координатах. Расчет режима ЭЭС, содержащей АКН, ведется для каждой гармоники отдельно. Для первой гармоники осуществляется итерационный расчет режима независимо от того, является схема замещения линейной или нелинейной.

В начальном приближении для каждого из АКН, имеющих в системе, задается некоторое значение угла трехфазной симметричной системы напряжения в виде

$$\delta_k = \begin{bmatrix} \delta_{Ak} \\ \delta_{Ak} - 120^\circ \\ \delta_{Ak} + 120^\circ \end{bmatrix},$$

где δ_{Ak} – угол напряжения фазы A на шинах АКН с номером k .

Тогда матрица углов напряжений АКН имеет вид

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_n \end{bmatrix},$$

где n – число узлов, представляющих АКН в схеме.

Матрица δ имеет размерность $3n \times 1$.

Для принятых значений углов напряжения каждой фазы каждого АКН рассчитывается режим, то есть, решается система уравнений

$$W(X, \delta, Y) = 0, \quad (1)$$

где W – вектор-функция;

X – вектор-столбец зависимых параметров режима;

Y – вектор-столбец независимых параметров режима.

На каждой итерации δ задана и может быть отнесена к вектору независимых переменных Y . Выделение δ в (1) в виде отдельного вектора подчеркивает его особую роль в расчете несимметричного режима с учетом действия симметрирующих устройств.

Если для данной цепи система уравнений (1) нелинейная, то целесообразно не решать эту систему для принятого значения δ , а решать линеаризованную систему уравнений, то есть, производить лишь одну итерацию решения системы. Линеаризация может выполняться любым известным способом, например, заменой нелинейной функции первыми двумя членами разложения ее в ряд Тейлора – как при решении нелинейных уравнений методом Ньютона. Следующие итерации, необходимые для получения решения системы нелинейных уравнений, производятся при новых значениях δ .

По результатам расчета режима (или одной итерации расчета – для нелинейной цепи) для каждого АКН определяется суммарная мощность трех фаз $P_{\Sigma k}$. Из-за произвольного выбора начального приближения углов напряжений на шинах АКН $P_{\Sigma k}$ может существенно отличаться от величины потерь в АКН $P_{\Delta k}$. Поэтому на следующей итерации необходимо принять новые значения углов напряжений на шинах АКН:

$$\delta_{Ak}^{(i+1)} = \delta_{Ak}^{(i)} + \Delta\delta_k^{(i)},$$

где i – номер текущей итерации;

$\Delta\delta_k^{(i)}$ – величина необходимого изменения углов напряжений на шинах АКН с номером k , определенная на текущей итерации.

$\Delta\delta_k^{(i)}$ может быть определена в зависимости от $P_{\Sigma k}$:

$$\Delta\delta_k^{(i)} = K_{\Pi} (P_{\Sigma k}^{(i)} + P_{\Delta k}),$$

где K_{Π} - заранее заданный коэффициент.

На следующей итерации задаются значения углов фазных напряжений каждого АКН в виде

$$\delta_k^{(i+1)} = \begin{bmatrix} \delta_{Ak}^{(i)} + \Delta\delta_k^{(i)} \\ \delta_{Ak}^{(i)} - 120^\circ + \Delta\delta_k^{(i)} \\ \delta_{Ak}^{(i)} + 120^\circ + \Delta\delta_k^{(i)} \end{bmatrix}.$$

По измененным значениям δ вновь рассчитывается режим. Для нелинейной цепи после каждого расчета режима изменяются также значения вектора зависимых переменных X . Поэтому на каждой итерации решается система уравнений

$$W(X^{(i)}, \delta^{(i)}, Y) = 0.$$

После каждого расчета режима определяются новые значения углов напряжений на шинах АКН, обеспечивающие более точное соответствие суммарной мощности трех фаз потерям в АКН. Расчеты продолжаются до тех пор, пока не будет обеспечена заданная точность вычислений. Формальным признаком обеспечения заданной точности является удовлетворение неравенства

$$\left| \left| P_{\Sigma}^{(i)} - P_{\Delta} \right| \right| \leq \varepsilon_P, \quad (2)$$

где ε_P – матрица-столбец заранее заданных малых величин, характеризующих необходимую точность определения углов напряжений и активной мощности АКН.

Левая часть (2) представляет собой матрицу-столбец, каждый член которой равен модулю разности активной мощности АКН на данной итерации и потерь в АКН.

Для нелинейных цепей необходимо также выполнение условия

$$\left| \left| W(X^{(i)}, \delta^{(i)}, Y) \right| \right| \leq \varepsilon_X,$$

где ε_X – матрица-столбец заранее заданных малых величин, характеризующих необходимую точность определения независимых переменных.

Ускорение процесса сходимости итерационного расчета режима сети с симметрирующим устройством также может быть достигнуто за счет дополнения описанного закона изменения δ (который является пропорциональным: изменение δ пропорционально величине P_{Σ}) дифференциальным законом. Процесс расчета режима не является непрерывным во времени, а является дискретным по итерациям, поэтому вместо производной используется приращение

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{\Sigma}^{(i-1)} - P_{\Sigma}^{(i)}.$$

Закон изменения δ для симметрирующего устройства с номером k может быть записан в виде

$$\Delta \delta_k^{(i)} = K_{\Pi} \left(P_{\Sigma k}^{(i)} + P_{\Delta k} \right) + K_{\Delta} \cdot \Delta P_{\Sigma k}^{(i)},$$

где K_{Δ} - заранее заданный коэффициент перед «дифференциальной составляющей».

Схема замещения для высших гармоник предполагается линейной. При использовании фазных координат расчет ведется аналогично для всех высших гармоник. В установившемся режиме для высших гармоник АКН представляется в виде узлов с нулевым напряжением.

При равенстве напряжения базисного узла нулю уравнение узловых напряжений в матричном виде для отдельно взятой гармоники может быть записано как:

$$\underline{Y} \underline{U} = \underline{I}, \quad (3)$$

где $\underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & -\underline{Y}_{12} & \dots & -\underline{Y}_{1n} \\ -\underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \dots & -\underline{Y}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\underline{Y}_{n1} & -\underline{Y}_{n2} & \dots & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix}$ – матрица узловых проводимостей; \underline{Y}_{kj} ($k=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n; j \neq k$) – взаимная проводимость узлов k и j , равная сумме проводимостей ветвей, соединяющих эти ветви; \underline{Y}_{kk} ($k=1, 2, \dots, n$) – собственная проводимость узла k , равная сумме проводимостей всех ветвей, соединенных с узлом k ;

$\underline{I} = \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \dots \\ \underline{I}_n \end{bmatrix}$ – матрица задающих токов узлов; \underline{I}_k - задающий ток узла k .

При разделении всех узлов схемы на узлы примыкания АКН и прочие узлы уравнение (3) можно записать в виде

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{AA} & \underline{Y}_{A\Pi} \\ \underline{Y}_{\Pi A} & \underline{Y}_{\Pi\Pi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_{\Pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{J}_A \\ \underline{J}_{\Pi} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где \underline{Y}_{AA} - матрица собственных и взаимных проводимостей узлов примыкания АКН;

$\underline{Y}_{A\Pi}$, $\underline{Y}_{\Pi A}$ – матрицы, элементами которых являются проводимости между соответствующими узлами примыкания АКН и прочими узлами;

$\underline{Y}_{\Pi\Pi}$ - матрица собственных и взаимных проводимостей прочих узлов;

\underline{U}_{Π} - матрица-столбец напряжений прочих узлов;

\underline{J}_A - матрица-столбец задающих токов узлов примыкания АКН;

\underline{J}_{Π} - матрица-столбец задающих токов прочих узлов.

Из уравнения (4) можно выразить напряжения в прочих узлах:

$$\underline{U}_{\Pi} = \underline{Y}_{\Pi\Pi}^{-1} \left[\underline{J}_{\Pi} - \underline{Y}_{\Pi A} \underline{U}_A \right],$$

или, с учетом равенства $\underline{U}_A=0$,

$$\underline{U}_\Pi = \underline{Y}_{\Pi\Pi}^{-1} \underline{J}_\Pi. \quad (5)$$

При отличии напряжения базисного узла от нуля выражение (5) запишется как

$$\underline{U}_\Pi = \underline{U}_0 + \underline{Y}_{\Pi\Pi}^{-1} \underline{J}_\Pi.$$

Токи в ветвях могут быть определены по выражению

$$\underline{I} = \underline{Z}_B^{-1} [\underline{M}'_t \underline{U}_0 + \underline{E}],$$

где \underline{Z}_B - диагональная матрица сопротивлений ветвей;

\underline{M}'_t - транспонированная матрица инцидентий узлов и ветвей, строки которой соответствуют всем узлам за исключением базисного;

\underline{E} - матрица-столбец ЭДС в ветвях.

Для узлов примыкания АКН как бы не выполняется первый закон Кирхгофа. Сумма токов в узле дает ток высшей гармоники, протекающий в ветви АКН, притом, что сама эта ветвь в схеме отсутствует.

В результате расчетов режимов сети, содержащей АКН, определяется ток каждой гармоники в ветви каждой фазы АКН $I_A^{(v)}$. Через ток гармоники порядка v , протекающий в ветви АКН, можно определить фазное напряжение этой гармоники на выводах ПН в установившемся режиме (приведенное к стороне высокого напряжения трансформатора):

$$\underline{E}_{\Pi\Pi}^{(v)} = \underline{U}_{\text{т.п.}}^{(v)} + I_A^{(v)} \underline{Z}_T^{(v)}, \quad (6)$$

где $\underline{U}_{\text{т.п.}}^{(v)}$ - напряжение гармоники порядка v в точке подключения АКН (определяется в результате расчета режима);

$\underline{Z}_T^{(v)}$ - сопротивление трансформатора АКН току гармоники порядка v .

С учетом равенства напряжения высших гармоник в точке подключения АКН нулю, выражение (6) для высших гармоник можно записать как

$$\underline{E}_{\Pi\Pi}^{(v)} = I_A^{(v)} \underline{Z}_T^{(v)}.$$

Определив напряжение каждой гармоники на выводах ПН, можно вычислить фазную мощность ПН:

$$S_{\Pi\Pi} = E_{\Pi\Pi} I_A = \sqrt{\sum_{v=0}^{\infty} (E_{\Pi\Pi}^{(v)})^2} \sqrt{\sum_{v=0}^{\infty} (I_A^{(v)})^2}.$$

В четвертой главе выполнена оценка технической эффективности применения АКН в системе электроснабжения Байкало-Амурской магистрали (БАМ). Система электроснабжения БАМ представляет собой сложную электрическую систему большой протяженности, которая выполняет несколько важных социальных функций: обеспечивает движение электропоездов по северному транзиту Восточно-Сибирской железной дороги, снабжает электрической энергией население значительной территории, дает возможность

подключаться к электрическим сетям мощным горно-добывающим предприятиям. Качество электроэнергии в системе электроснабжения БАМ по основным показателям не отвечает требованиям ГОСТ Р 54149-2010.

При выборе мест установки и номинальных параметров АКН преследуется задача обеспечения на шинах 220 кВ всех подстанций системы электроснабжения БАМ КЭ, удовлетворяющего требованиям ГОСТ. Необходимо снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности. Расчеты, выполненные на основе имитационного моделирования движения поездов на межпоездном интервале, показывают, что установка двух АКН на подстанциях Киренга и Уоян позволяет добиться соответствия КЭ требованиям ГОСТ на всех подстанциях. На рисунках 6 и 7 приведены максимальные за межпоездной интервал значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности на шинах 220 кВ одной из фаз всех подстанций до и после установки АКН. Нормально допустимые значения этих коэффициентов для сетей 220 кВ составляют 2 %. Подстанции на диаграммах расположены в порядке их следования с запада на восток.

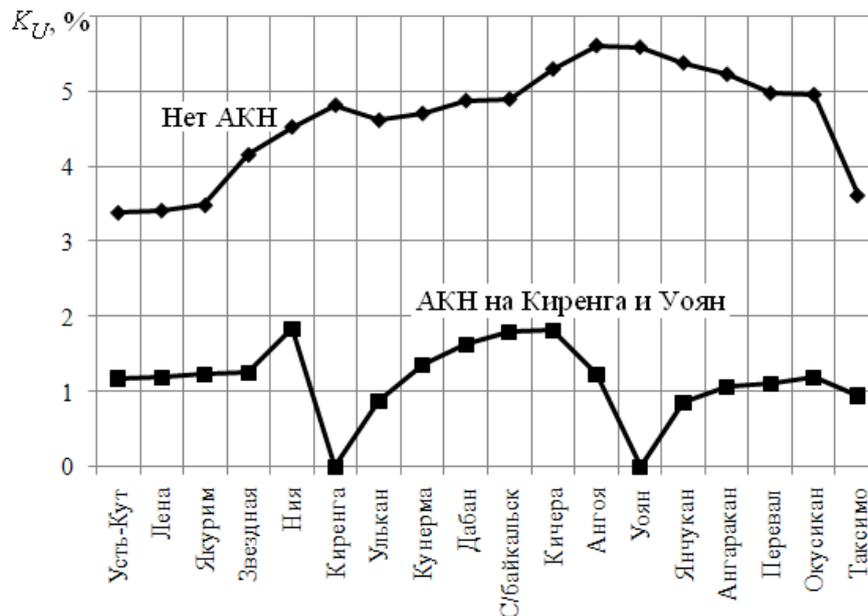


Рисунок 6 - Влияние АКН на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

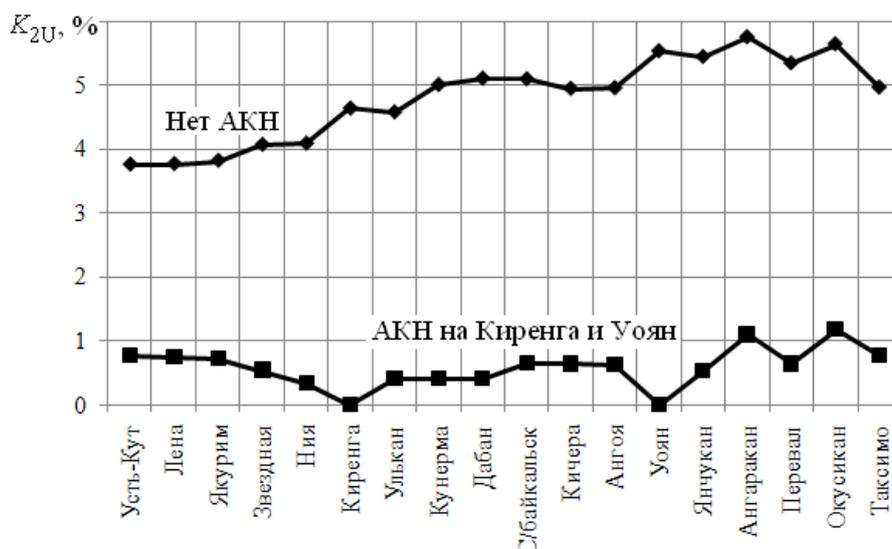


Рисунок 7 - Влияние АКН на коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности

В системе электроснабжения БАМ наблюдаются колебания напряжения, обусловленные движением мощных электровозов. Колебания напряжения снижают эффективность работы сети 220 кВ и осложняют регулирование напряжения в точках питания электроприемников. На рисунке 8 показано влияние АКН на размах колебаний напряжения, то есть, разность максимального и минимального значения напряжения за межпоездной интервал.

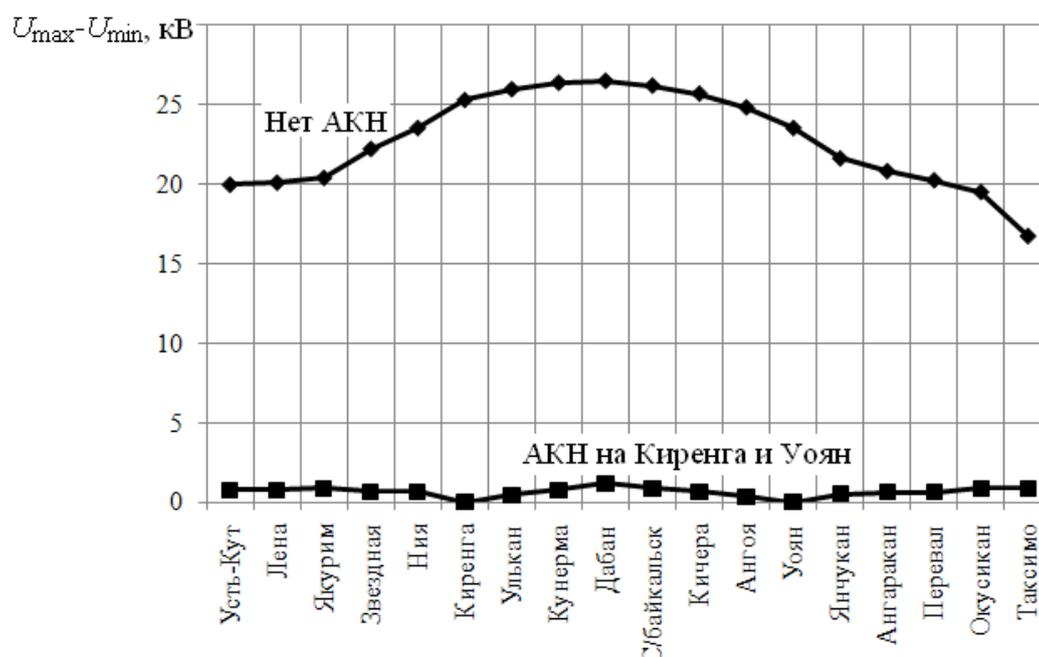


Рисунок 8 - Влияние АКН на размах колебаний напряжения

Мощность предложенных АКН на подстанциях Киренга и Уоян оценена в 45 - 50 МВА при условии их воздействия на амплитуду, симметрию и гармонический состав напряжения. В то же время, регулирование амплитуды и симметрирование напряжения может осуществляться более дешевыми

устройствами, такими как пофазно управляемые статические тиристорные компенсаторы. Функция улучшения гармонического состава напряжения может быть возложена только на АКН. В этом случае достаточная мощность АКН составляет 20 - 25 МВА.

Проведенное исследование демонстрирует высокую эффективность АКН в решении задачи повышения КЭ в системе электроснабжения БАМ. Для обеспечения допустимого по ГОСТ КЭ достаточно установки двух АКН, тогда как решение задачи с помощью поперечных АФГ приводит к необходимости установки одного или двух однофазных устройств на каждой тяговой подстанции. Схожие результаты можно получить при применении АКН в подобных электрических сетях, питающих тяговую нагрузку, например на Забайкальской, Западно-Сибирской железных дорогах.

Применение АКН также может быть целесообразно в других электрических сетях. Сегодня практически в каждой квартире и на каждом промышленном предприятии присутствуют выпрямители, работа которых обуславливает протекание несинусоидальных токов и, как следствие, искажение формы кривой напряжения. В будущем число и мощность преобразовательных электроприемников будут только расти. В таких условиях любое присоединение электрической сети может рассматриваться как источник искажений. Существующие средства и способы повышения КЭ предназначены для исключения искажений только одного присоединения. Более выгодным может быть централизованное повышение КЭ, обеспечиваемое АКН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложено принципиальное решение актуальной задачи повышения качества электроэнергии в высоковольтных электрических сетях, питающих тяговую нагрузку. Полученные результаты могут служить основой проектов реконструкции системы электроснабжения Байкало-Амурской магистрали и других подобных систем.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1) Исследованы особенности тяговой нагрузки, обуславливающие низкое качество электроэнергии в питающих ее электрических сетях. Для обеспечения надлежащего качества электроэнергии необходимо применение специальных технических средств. Показано, что существующие средства и способы повышения качества электроэнергии (как традиционные, так и современные) не вполне подходят для применения в электрических сетях, питающих тяговую нагрузку.

2) Предложено воздействие на амплитуду, симметрию и гармонический состав напряжения в сети высокого напряжения. Это позволяет при установке одного устройства повышать качество электроэнергии в обширной сети. Предложены схема построения и основная идея управления устройством централизованного повышения качества электроэнергии, получившим название активный кондиционер напряжения.

3) Предложены алгоритмы управления активным кондиционером напряжения. Система управления контролирует набор регулируемых величин и вырабатывает соответствующий набор управляющих воздействий.

4) Разработана цифровая модель электроэнергетической системы с активным кондиционером напряжения. На модели продемонстрирована работоспособность и высокое быстродействие активного кондиционера напряжения.

5) Разработан алгоритм расчета установившихся режимов электроэнергетических систем, содержащих активные кондиционеры напряжения. В случае несинусоидального режима расчет осуществляется отдельно для каждой гармоники. В алгоритме расчета первой гармоники учитывается симметрирующее действие активного кондиционера напряжения. Этот алгоритм может быть применен для расчета установившихся режимов электроэнергетических систем, содержащих любые устройства симметрирования напряжения, например, пофазно управляемые средства компенсации реактивной мощности.

6) Произведена оценка эффективности применения активных кондиционеров напряжения в электроэнергетических системах с множественными искажающими нагрузками на примере системы электроснабжения Байкало-Амурской магистрали. Получены положительные результаты, позволяющие рекомендовать установку активных кондиционеров напряжения в высоковольтных электрических сетях, питающих тяговую нагрузку.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Рогов, Г. В. Применение преобразователей напряжения для повышения качества электроэнергии в системах внешнего электроснабжения железных дорог / Г. В. Рогов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 2. – С. 261–264.

2. Рогов, Г. В. Моделирование установившихся режимов электрических систем с учетом устройств симметрирования напряжения / Г. В. Рогов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 1 (37). – С. 111–115.

3. Рогов, Г. В. Комплексное повышение качества электроэнергии в сложных сетях / Г. В. Рогов // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 322, № 4. — С. 77–81.

Публикации в других изданиях

4. Рогов, Г. В. Активный кондиционер напряжения как средство повышения качества электроэнергии / Г. В. Рогов // Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах : тез. докл. междунар. молодежной науч.-техн. конф., г. Новосибирск, 21–24 сент. 2011 г. – Новосибирск : изд-во НГТУ, 2011. – С. 52.

5. Рогов, Г. В. Повышение качества электроэнергии в сетях БАМ и Забайкальской железной дороги / Г. В. Рогов // Релейная защита и противоаварийная автоматика. Перспективы развития : сб. докл. конф., Ч. 2, г. Кемерово, 06 декаб. 2011. — Кемерово: ОДУ Сибири, 2011. — С. 8–16.

6. Рогов, Г. В. Несимметрия в системах электроснабжения железных дорог / Г. В. Рогов // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. 4 междунар. науч.-техн. конф., Т. 2., г. Новочеркасск, 14–18 октяб. 2013 г. — Новочеркасск : Лик, 2013. — С. 361–364.