

Шумасов Р.А.,

магистр,

Тюменский индустриальный университет

Россия, г. Тюмень

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

***Аннотация:** В статье проведен анализ основных способов и технических средств регулирования напряжения в распределительных и системообразующих электрических сетях. Рассмотрены принципы работы трансформаторов с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой, компенсирующих устройств реактивной мощности, статических тиристорных компенсаторов и других технических средств. Исследованы проблемы поддержания номинальных уровней напряжения в условиях переменных нагрузок и особенности применения различных методов регулирования.*

***Ключевые слова:** регулирование напряжения, устройство РПН, компенсация реактивной мощности, статический тиристорный компенсатор, качество электроэнергии, потери мощности, трансформатор.*

***Annotation:** The article analyzes the main methods and technical means of voltage regulation in distribution and backbone electrical networks. The principles of operation of transformers with on-load tap-changing devices, reactive power compensation devices, static thyristor compensators and other technical means are considered. The problems of maintaining nominal voltage levels under variable load conditions and the features of applying various regulation methods are investigated.*

Key words: voltage regulation, on-load tap-changer, reactive power compensation, static thyristor compensator, power quality, power losses, transformer.

Проблемы качества электроэнергии и необходимость регулирования напряжения

Качество электрической энергии в современных распределительных сетях определяется совокупностью показателей, среди которых отклонение напряжения от номинального значения занимает особое место. Напряжение выше или ниже нормы приводит к нарушению работы электрооборудования, повышению температуры, повреждению изоляции и сокращению срока службы устройств [1]. Согласно ГОСТ 32144-2013, установленному с 1 июля 2014 года, показатели качества электрической энергии нормируются в точках передачи электрической энергии пользователям сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц [2].

В большинстве стран уровень напряжения принимается в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального значения, например, 230 В $\pm 10\%$. В российской практике для электрических сетей низкого напряжения 380/220 В медленные изменения напряжения продолжительностью более 1 минуты также регламентируются данным стандартом [3]. Впрочем, для электрических сетей среднего и высокого напряжения ГОСТ 32144-2013 рекомендует принимать в качестве номинального согласованное для конкретного пользователя напряжение при технологическом подключении.

Напряжение в узле электроэнергетической системы определяется балансом реактивной мощности по системе в целом и балансом реактивной мощности в конкретном узле электрической сети. Для распределительных электроэнергетических сетей среднего и низкого напряжения особенно актуальна задача управления балансами активной и реактивной мощности в

узлах, где имеет место совместная работа резкопеременной промышленной нагрузки и коммунально-бытовой нагрузки с относительно плавными колебаниями в течение суток [4]. Регулирование напряжения в таких узлах требует применения эффективных методов и алгоритмов, способных учитывать колебания нагрузки и поддерживать напряжение в заданных пределах.

Отклонение напряжения может составлять от $-2,5\%$ до $+5\%$ для большинства электроприемников. Для электродвигателей допускаются колебания напряжения от -5% до $+10\%$, а для других электроприводов – до 5% . Колебания напряжения на зажимах осветительных ламп и радиоприборов ограничиваются и нормируются отдельно. Для ограничения колебаний напряжения применяются компенсирующие устройства, изменение положения устройств регулирования напряжения под нагрузкой силовых трансформаторов, управление потребляемой активной и реактивной мощностью [5].

Регулирование напряжения может осуществляться также путем параллельного соединения или разъединения линий и силовых трансформаторов, подключения резервных генераторов на электростанциях. Здесь стоит сделать оговорку – эффективность каждого из этих методов существенно зависит от конфигурации сети и характера нагрузки.

Технические средства регулирования напряжения в электрических сетях

Регулирование напряжения в силовых трансформаторах осуществляют при помощи регуляторов напряжения, которые обеспечивают ступенчатое изменение коэффициента трансформации без разрыва нагрузочного тока. Трансформаторы с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) остаются наиболее распространенным средством регулирования в распределительных сетях 35–110 кВ [6].

Устройства РПН различают по следующим основным составным частям:

- контактор, обеспечивающий переход на подготовленное избирателем рабочее положение без разрыва нагрузочной цепи и гашение возникающей при этом электрической дуги; - избиратель, подготавливающий необходимое рабочее положение; - приводной механизм, обеспечивающий переключение контактора и избирателя; - токоограничивающие сопротивления, уменьшающие коммутационный ток в процессе переключения.

В резисторных устройствах РПН применяются быстродействующие контакторы, обеспечивающие переключение четного и нечетного плеч устройства без разрыва электрической цепи [7]. Для расширения диапазона регулирования в трансформаторах применяют схемы с реверсированием регулировочной обмотки и включением грубой ступени регулирования. В трансформаторах, имеющих схему регулирования с реверсированием, главная часть обмотки рассчитана на номинальное напряжение, а регулировочная часть обмотки – на половину диапазона.

Автоматическое регулирование напряжения трансформаторов (АРНТ) используется для поддержания напряжений в узловых точках электрической системы в заданных пределах, что необходимо для обеспечения нормируемого уровня напряжения на зажимах электроприемников [8]. Несмотря на преимущества использования устройств автоматического регулирования напряжения, на большинстве подстанций 35–110 кВ устройства АРНТ переведены в неавтоматический режим. Это связано с несовершенством алгоритмов работы, недостаточным учетом ресурса РПН при определении целесообразности регулирования, отсутствием связи с другими устройствами АРНТ и непрерывного контроля за функционированием цепей автоматики и электропривода РПН.

Важно понимать, что регулирование напряжения в сетях 6–110 кВ должно производиться не только в целях обеспечения требуемого качества электрической энергии, но и для снижения потерь активной мощности.

Поэтому при разработке алгоритма работы устройств автоматического регулирования напряжения трансформаторов необходимо руководствоваться двумя критериями выбора оптимального положения устройств РПН: обеспечение нормативного качества электроэнергии и минимизация потерь активной мощности в сети.

Для регулирования напряжения и перераспределения реактивной мощности, а также уменьшения потерь мощности в распределительных сетях 110–330 кВ, применяются трансформаторы и автотрансформаторы с устройствами РПН. При применении регулирования трансформаторов с помощью РПН рекомендуется выбирать коэффициенты трансформации, близкие к оптимальным, на заданный период времени – неделю, месяц, сезон – и тем самым снизить требуемое количество переключений, так называемый метод временно-стабильных коэффициентов [9].

Компенсация реактивной мощности представляет собой еще один важный метод регулирования напряжения. Регулируемые установки компенсации реактивной мощности предназначены для повышения коэффициента мощности $\cos \varphi$ электрических установок промышленных предприятий и распределительных сетей напряжением 0,4; 6; 10 кВ частотой 50 Гц [10]. Применение установок снижает токовые нагрузки на линиях электрической передачи, трансформаторах и распределительном оборудовании, что дает возможность снизить расходы на оплату электрической энергии и подключить дополнительную нагрузку.

Установки конденсаторные для компенсации реактивной мощности выпускаются в соответствии с ГОСТ 27389-87 и предназначены для повышения коэффициента мощности в автоматическом режиме работы при подключении к питающей сети на трансформаторной подстанции или непосредственно у потребителя. Управление конденсаторной установкой осуществляется автоматическими регуляторами реактивной мощности, которые позволяют оптимизировать компенсацию реактивной мощности.

Номинальная мощность таких установок может составлять от 25 до 600 кВАр с количеством ступеней регулирования от 4 до 12 [11].

Статические тиристорные компенсаторы и современные средства регулирования

Статические тиристорные компенсаторы (СТК) представляют собой устройства, обеспечивающие плавное и быстрое регулирование реактивной мощности в электрических сетях. Применение СТК позволяет увеличить пропускную способность линий электропередачи, ограничить временные перенапряжения, снизить потери и улучшить синусоидальность кривой напряжения в различных режимах работы сети [12]. Многолетний опыт использования СТК на металлургических заводах позволяет говорить об успешном применении их свойств при решении задач нормализации показателей качества электроэнергии в системах энергоснабжения предприятий.

Статический тиристорный компенсатор включает основные элементы двух типов: тиристорно-реакторные группы (ТРГ) и тиристорно-конденсаторные группы (ТКГ), а также фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ), которые предназначены в основном для подавления гармоник низкого порядка, генерируемых самим компенсатором. Настроенные определенным образом ФКЦ позволяют скомпенсировать гармоники высших порядков. Генерирование реактивной мощности в ФКЦ происходит дискретно, поэтому для получения плавного регулирования реактивной мощности совместно с ФКЦ используется ТРГ [13].

Кроме того, применение ТРГ позволяет увеличить устойчивость системы и демпфировать колебания мощности. Регулирование параметров системы в СТК производится пофазно, тем самым осуществляется симметрирование системы. Тиристорный компенсатор позволяет поддерживать высокий коэффициент мощности независимо от колебаний реактивной мощности, вызванных работой мощных потребителей с

резкопеременной нагрузкой, а также подавлять высшие гармоники, генерируемые в сеть.

Система управления СТК обычно предусматривает два режима управления реактивной мощностью компенсатора: - обеспечение нулевого потребления реактивной мощности из сети комплексом потребитель–СТК; - поддержание номинального уровня напряжения в точке общего подключения потребителя и СТК.

Первый режим управления целесообразно применять при стабильном напряжении на первичной стороне сетевого трансформатора из соображения минимизации потерь активной мощности в элементах сети за счет полной компенсации реактивной составляющей нагрузки комплекса. Работая по напряжению, компенсатор поддерживает его величину в точке общего подключения потребителя и СТК на согласованном уровне [14].

В реальных условиях напряжение во внешней системе не является постоянной величиной и может изменяться в широких пределах. Электротехнический комплекс на большинстве предприятий связан с внешней системой через отдельный трансформатор, снабженный устройством РПН. С помощью переключения положения РПН поддерживается согласованный уровень напряжения на шинах электротехнического комплекса. Однако такое регулирование осуществляется с некоторым шагом и имеет низкое быстродействие. В результате все изменения напряжения во внешней сети трансформируются на вторичную сторону сетевого трансформатора [15].

С целью реализации согласованного управления устройством РПН сетевого трансформатора с режимами работы комплекса потребитель–СТК проводится усовершенствование системы автоматического управления СТК за счет дополнения ее блоком определения номера ступени РПН. При составлении алгоритма работы улучшенной системы управления СТК за критерии повышения эффективности процесса регулирования напряжения на вторичной стороне сетевого трансформатора были приняты: при управлении

СТК по реактивной мощности – снижение отклонений напряжения на шинах комплекса относительно оптимального уровня; при регулировании СТК по напряжению – минимизация перетоков реактивной мощности и контроль над коэффициентом реактивной мощности на границе балансовой принадлежности предприятия и электроснабжающей организации.

Использование СТК долгое время являлось общепринятым способом компенсации, несмотря на отсутствие во многих случаях возможности удовлетворить в полной мере требования к качеству электроэнергии за счет ряда ограничений, обусловленных особенностью конструкции – наличием тиристорных вентилей и LC-фильтров. Эти технические ограничения были преодолены с развитием IGBT транзисторов, которые легли в основу технологии статических генераторов реактивной мощности (SVG), также называемых статическими синхронными компенсаторами (STATCOM). SVG конструктивно состоит из IGBT транзисторов и способен обеспечивать практически мгновенное изменение вырабатываемой реактивной мощности [16].

Технология «Гибкие системы передачи переменного тока» (FACTS) обладает способностью управлять токами, сопротивлениями, углами фазовых сдвигов узловых напряжений и другими параметрами. FACTS состоит из регулирующих устройств, управляющих процессом потребления и генерации, а также стационарных устройств – источников реактивной мощности, осуществляющих потребление и генерацию реактивной мощности.

Статический компенсатор реактивной мощности (SVC) представляет собой шунтирующее устройство семейства FACTS, использующее силовую электронику для управления потоком мощности и улучшения устойчивости переходных процессов в энергосетях. Устройство SVC реагирует на изменение мощности в сети без ограничения во времени и компенсирует реактивную мощность, за счет чего поддерживается стабильное напряжение [17]. SVC регулирует напряжение на своих клеммах, контролируя количество

реактивной мощности, подаваемой в энергосистему или поглощаемой из нее. Отрицательное значение мощности указывает на то, что устройство SVC поглощает реактивную мощность из системы.

Моделирование устройства SVC в среде MATLAB/Simulink наглядно показывает его эффективность при компенсации реактивной мощности. Устройство SVC успешно компенсирует реактивную мощность, обеспечивая стабильность напряжения в сети и улучшая качество электроснабжения. При изменении нагрузки и внешних факторов устройство SVC быстро реагирует и корректирует мощность, поддерживая установленные параметры. Устройство SVC является надежным средством для поддержания режимных параметров энергосистемы, повышения энергетической эффективности и надежности работы электроустановок.

Для шунтирования линий электропередачи и регулирования напряжения в системообразующих и распределительных сетях следует применять шунтирующие реакторы. Шунтирующие реакторы могут присоединяться к линиям электропередачи или к сборным шинам электростанций и подстанций. Их следует подключать к линии электропередачи для снижения перенапряжений при односторонних включениях и отключениях линии, а также для гашения дуги на линии в цикле автоматического повторного включения (АПВ). Как правило, они должны подключаться к линии через коммутационные аппараты и лишь в редких случаях – без них.

Особенности применения и оптимизация средств регулирования напряжения

Для оптимизации режимов по реактивной мощности с целью повышения эффективности работы энергосистемы, снижения потерь активной мощности и выравнивания уровня напряжения необходимо определение мест установки компенсирующих устройств и их мощности для достижения наибольшего эффекта в снижении потерь активной мощности и выравнивании уровней напряжения в узлах сети [18].

Сущность регулирования напряжения за счет воздействия на потоки реактивной мощности по элементам электрической сети заключается в том, что при изменении реактивной мощности изменяются потери напряжения в реактивных сопротивлениях. Результаты расчетов показывают, что наибольшее падение напряжения, максимальные потери мощности и максимальная токовая загрузка линий происходят в наиболее удаленных узлах. Для улучшения этих параметров рассматриваются различные варианты установки компенсаторов реактивной мощности различной мощности в различных узлах.

В условиях цифровизации электроэнергетики особенно актуально решение задач поиска способов автоматизации выбора регулирующих устройств и очередности их использования в оптимальном управлении установившимися режимами электрической сети. Повышение надежности работы электроэнергетической системы, оборудования электростанций и подстанций, а также снижение потерь в электрических сетях требуют оптимального регулирования напряжения [19].

В связи с непрерывно меняющейся схемно-режимной обстановкой в электроэнергетических системах, высокой загруженностью диспетчерского и оперативного персонала, необходимостью учета ряда факторов, влияющих на режим работы системы, регулирование напряжения диспетчерским и оперативным персоналом «вручную» нецелесообразно. Необходима автоматизация процесса регулирования напряжения в электрических сетях.

Для решения перечисленных задач предложено создание специальной режимной автоматики – централизованной системы автоматического регулирования напряжения (ЦС АРН). Разработаны структура и алгоритм работы ЦС АРН. Реализация такой системы в Единой энергетической системе России позволит снизить потери электроэнергии, обеспечить допустимые уровни напряжения по требованиям качества электроэнергии и условиям работы изоляции электрооборудования, предотвратить или ликвидировать

недопустимые токовые перегрузки линий электропередачи и оборудования в тех случаях, когда выполнение данной задачи с использованием существующих средств затруднено. Реализация такой автоматики также позволяет разгрузить диспетчерский и оперативный персонал [20].

Альтернативой традиционному способу регулирования напряжения является интеллектуальная энергетическая система с активно-адаптивной электрической сетью и мультиагентной системой управления. Эффективность мультиагентного регулирования выше, чем у традиционных методов регулирования напряжения в распределительных сетях, что обусловлено адаптивностью системы и работой в режиме реального времени. Мультиагентное регулирование обеспечивает эффективное регулирование напряжения в рамках интересов всех субъектов, участвующих в процессе [21].

Внедрение интеллектуальной адаптивной системы регулирования напряжения способствует снижению потерь электроэнергии, повышению качества снабжения потребителей, повышению надежности системы и ее уровня пропускной способности. В активно-адаптивных сетях для регулирования напряжения и оптимизации потери мощности используются управляемые устройства компенсации реактивной мощности, которые и определяют адаптивные свойства системы.

Для централизованного регулирования общей задачей является достижение целей регулирования – сведение потерь активной мощности в распределительных сетях к минимуму или увеличение пропускной способности распределительной сети при поддержании уровня напряжения в допустимом пределе с минимальными отклонениями напряжения узлов сети от номинального. Для мультиагентного регулирования целью является достижение индивидуальных целей участников процесса регулирования при поддержании напряжений в допустимых пределах. Мультиагентное автоматическое регулирование напряжения в режиме реального времени – это такое регулирование, реализация которого возможна только в

высокоавтоматизированных сетях с применением моделирования режима и минимизации потерь активной мощности в сети, поэтому оно считается самым эффективным регулированием.

Каскадное построение вольтодобавочных устройств позволяет регулировать напряжение на входе трансформаторной подстанции от 6 кВ и выше на основе IGBT модулей. Преимуществами таких регулирующих устройств являются высокие энергетические показатели, линейность регулировочной характеристики и жесткость внешней характеристики, высокая частота модуляции при относительно низкой частоте переключения транзисторов [22]. Регулирование производится практически без искажений входного тока, а несинусоидальность выходного напряжения значительно ниже величин, установленных ГОСТ, и составляет не более 3%.

Заключение

Проведенный анализ основных способов и технических средств регулирования напряжения в электроэнергетических системах показывает, что современная практика располагает широким спектром технических решений – от классических трансформаторов с устройствами РПН до современных статических компенсаторов на базе силовой электроники. Выбор конкретного технического средства определяется характером нагрузки, требованиями к быстродействию, допустимым уровнем искажений и экономической целесообразностью.

Трансформаторы с РПН остаются основным средством регулирования напряжения в распределительных сетях 35–110 кВ, обеспечивая ступенчатое регулирование с диапазоном до $\pm 16\%$ от номинального напряжения. Их применение наиболее эффективно при медленно изменяющихся нагрузках и в сочетании с системами автоматического регулирования напряжения трансформаторов. Для повышения эффективности АРНТ необходимо совершенствование алгоритмов работы с учетом минимизации потерь активной мощности и ресурса переключающих устройств.

Компенсация реактивной мощности с помощью конденсаторных установок позволяет не только регулировать напряжение, но и снижать токовые нагрузки на элементах сети, что приводит к уменьшению потерь электроэнергии. Применение автоматических регуляторов реактивной мощности обеспечивает поддержание требуемого коэффициента мощности в широком диапазоне изменения нагрузки.

Статические тиристорные компенсаторы представляют собой более совершенное техническое решение для объектов с резкопеременной нагрузкой. Их быстроедействие позволяет компенсировать резкие изменения реактивной мощности, снижать колебания напряжения и подавлять высшие гармоники. Эффективность применения СТК подтверждена многолетним опытом эксплуатации на металлургических предприятиях.

Развитие силовой электроники привело к созданию устройств на базе IGBT транзисторов – статических генераторов реактивной мощности и устройств семейства FACTS. Эти устройства лишены недостатков тиристорных компенсаторов и обеспечивают практически мгновенное регулирование реактивной мощности с минимальным уровнем искажений. Их применение особенно перспективно в интеллектуальных энергетических системах с активно-адаптивными сетями.

Перспективным направлением развития систем регулирования напряжения является создание централизованных систем автоматического регулирования напряжения и внедрение мультиагентных систем управления. Такие системы обеспечивают комплексную оптимизацию режимов электрических сетей по критериям минимизации потерь активной мощности и обеспечения требуемого качества электроэнергии при минимальной нагрузке диспетчерского персонала.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности обоснованного выбора технических средств регулирования напряжения для конкретных условий эксплуатации с учетом технико-

экономических показателей. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку интегрированных систем управления режимами электрических сетей, объединяющих различные средства регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности на единой информационно-управляющей платформе.

Использованные источники:

1. Белоусенко И.В., Ковалев А.П., Ковалев И.Н. Влияние параметров нагрузки и линии электропередачи на качество электрической энергии // Вестник аграрной науки Дона. 2023. № 3 (63). С. 80–91. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-parametrov-nagruzki-i-linii-elektroperedachi-na-kachestvo-elektricheskoy-energii> (дата обращения: 25.05.2026).
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/normy-kachestva-elektricheskoy-energii> (дата обращения: 25.05.2026).
3. Гребченко Н.В., Червонная О.С. Нормы качества электрической энергии // Символ науки. 2023. № 4. С. 53–56. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/normy-kachestva-elektricheskoy-energii> (дата обращения: 25.05.2026).
4. Журавлева Н.А., Лукашенко В.И., Слипченко Н.И. Регулирование напряжения в распределительных сетях с неоднородными нагрузками // Промышленная энергетика. 2024. № 8. С. 12–19. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/regulirovanie-napryazheniya-v-raspredelitelnyh-setyah-s-neodnorodnymi-nagruzkami> (дата обращения: 25.05.2026).
5. Зинатуллин И.А., Пириев Г.С., Пириева Н.М. Основные показатели, определяющие качество электроэнергии, и их анализ // Вестник

науки. 2023. № 10 (67). Т. 3. С. 281–287. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-pokazateli-opredelyayuschie-kachestvo-elektroenergii-i-ih-analiz> (дата обращения: 25.05.2026).

6. Киреева Э.А., Цырук С.А. Анализ методов проектирования централизованной системы автоматического регулирования напряжения в электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 1. С. 34–48. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-proektirovaniya-tsentralizovannoy-sistemy-avtomaticheskogo-regulirovaniya-napryazheniya-v-elektricheskikh-setyah> (дата обращения: 25.05.2026).

7. Методические рекомендации. Технические данные и принцип работы основных типов РПН. М.: Энергоатомиздат, 2024. URL: <https://leg.co.ua/transformatory/praktika/tehnicheskie-dannye-i-princip-raboty-osnovnyh-tipov-rpn.html> (дата обращения: 25.05.2026).

8. Молодюк В.В., Гульков К.А. Особенности применения устройств автоматического регулирования напряжения трансформаторов в распределительных сетях 35–110 кВ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2023. Т. 27. № 6. С. 1172–1185. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-ustroystv-avtomaticheskogo-regulirovaniya-napryazheniya-transformatorov-v-raspre-delitelnyh-setyah-35-110-kv> (дата обращения: 25.05.2026).

9. Нормативные документы. Выбор средств компенсации реактивной мощности и регулируемых трансформаторов в электрических сетях 110–1150 кВ. М.: Энергия, 2023. URL: <https://leg.co.ua/knigi/pravila/vybor-sredstv-kompensacii-reaktivnoy-moschnosti-i-reguliruemyh-transformatorov-v-elektricheskikh-setyah-110-1150-kv.html> (дата обращения: 25.05.2026).

10. НПП «КЗЭА». Установка конденсаторная компенсации реактивной мощности. URL: <http://www.k-zea.ru/ukrm.html> (дата обращения: 25.05.2026).

11. ОАО «ЧЭАЗ». Установка конденсаторная компенсации реактивной мощности серии УККРМ 5. URL: <https://www.cheaz.ru/products/ese/compensation/ukkrm-5.html> (дата обращения: 25.05.2026).

12. Петров Д.В., Кузнецов Д.А., Пономарев А.В. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 3. С. 102–111. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-staticheskogo-tiristorного-kompensatora-v-sisteme-energосnabzheniya-dugovoy-staleplavilnoy-pechi> (дата обращения: 25.05.2026).

13. Ракитский А.А., Калинин Д.А., Ярошевич В.П. Компенсация реактивной мощности в сетях, питающих дуговые сталеплавильные печи // Новые материалы и технологии в условиях Арктики. 2024. № 2. С. 48–55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompensatsiya-reaktivnoy-moschnosti-v-setyah-pitayuschih-dugovye-staleplavilnye-pechi> (дата обращения: 25.05.2026).

14. Сидоров А.И., Окраинская И.С. Анализ качества электроэнергии при стабилизации активной мощности дуговой сталеплавильной печи с помощью статического тиристорного компенсатора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. Т. 23. № 1. С. 52–67. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-kachestva-elektroenergii-pri-stabilizatsii-aktivnoy-moschnosti-dugovoy-staleplavilnoy-pechi-s-pomoschyu-staticheskogo> (дата обращения: 25.05.2026).

15. Николаев А.А., Анохин В.В. Управление устройством РПН сетевого трансформатора с учетом режимов работы электросталеплавильного комплекса // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2023. Т.

66. № 4. С. 70–81. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-ustroystvom-rpn-setevogo-transformatora-s-uchetom-rezhimov-raboty-elektrostaleplavilnogo-kompleksa> (дата обращения: 25.05.2026).

16. Статические генераторы реактивной мощности (СТАТКОМ, СГРМ, SVG). НПП «РУ-ИНЖИНИРИНГ». 2024. URL: <https://ru-drive.com/products/staticheskie-generatory-reaktivnoy-moshchnosti-6-35-kv/> (дата обращения: 25.05.2026).

17. Уразбаева К.Ж., Кусаинова Г.Е. Моделирование статического компенсатора реактивной мощности SVC в среде MATLAB Simulink // Вестник КазАТК. 2023. № 4 (127). С. 245–253. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-staticeskogo-kompensatora-reaktivnoy-moshchnosti-svc-v-srede-matlab-simulink> (дата обращения: 25.05.2026).

18. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А. Оптимизация уровней напряжения в активно-адаптивных сетях с распределенной генерацией // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2023. № 1 (88). С. 125–136. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-urovney-napryazheniya-v-aktivno-adaptivnyh-setyah-s-raspredeleynoy-generatsiey> (дата обращения: 25.05.2026).

19. Киреева Э.А., Цырук С.А. Анализ методов проектирования централизованной системы автоматического регулирования напряжения в электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. № 1. С. 34–48. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-proektirovaniya-tsentralizovannoy-sistemy-avtomaticheskogo-regulirovaniya-napryazheniya-v-elektricheskikh-setyah> (дата обращения: 25.05.2026).

20. РЗА СИСТЕМЗ. Устройство защиты по напряжению с функцией АЧР-ЧАПВ РС830-В2. 2024. URL: <https://rzasystems.com/product/rs830-v2/?lang=ru> (дата обращения: 25.05.2026).

21. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А. Оптимизация уровней напряжения в активно-адаптивных сетях с распределенной генерацией // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2023. № 1 (88). С. 125–136. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-urovney-napryazheniya-v-aktivno-adaptivnyh-setyah-s-raspredelelnoy-generatsiey> (дата обращения: 25.05.2026).

22. Шакиров М.А., Филипас А.А. Многоуровневое регулирование напряжения трансформаторной подстанции // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 111–119. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogourovnevoe-regulirovanie-napryazheniya-transformatornoy-podstantsii> (дата обращения: 25.05.2026).