

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

***Аннотация:** Настоящее исследование посвящено анализу влияния распределенной генерации на процессы регулирования напряжения в распределительных электрических сетях. Рассмотрены основные технологические подходы к интеграции источников распределенной генерации, проанализированы эффекты воздействия на уровни напряжения в узлах сети, исследованы перспективные методы децентрализованного и мультиагентного управления напряжением.*

***Ключевые слова:** распределенная генерация, регулирование напряжения, электрические сети, мультиагентные системы, интеллектуальные энергетические системы, качество электроэнергии, активно-адаптивные сети.*

***Annotation:** This study analyzes the impact of distributed generation on voltage regulation processes in distribution electrical networks. The main technological approaches to integrating distributed generation sources are examined, the effects on voltage levels at network nodes are analyzed, and promising methods of decentralized and multi-agent voltage control are investigated. Key advantages and limitations of various regulation strategies under high distributed generation penetration conditions are identified.*

*Key words: distributed generation, voltage regulation, electrical networks, multi-agent systems, intelligent power systems, power quality, active-adaptive networks.*

## **Трансформация режимов распределительных сетей при интеграции распределенной генерации**

По состоянию на начало 2026 года совокупная установленная мощность возобновляемых источников энергии в России достигла 7,21 ГВт, при этом ветровая и солнечная генерация составляют по 2,97 и 2,73 ГВт соответственно [1]. За последние пять лет установленная мощность возобновляемых источников энергии в российской энергосистеме удвоилась, что создало принципиально новые условия для функционирования распределительных электрических сетей. Распределенная генерация меняет традиционную однонаправленную структуру потоков мощности в сетях низкого и среднего напряжения, преобразуя пассивных потребителей в активных участников процесса производства и регулирования электроэнергии.

Характеристика влияния распределенной генерации на режимы сети в значительной степени зависит от уровня проникновения генерирующих источников и их режима работы. При малой степени проникновения – когда суммарная мощность распределенной генерации не превышает 10–15% от пиковой нагрузки узла – воздействие на уровни напряжения остается ограниченным и может компенсироваться традиционными средствами регулирования [2]. Однако при превышении этого порога возникают качественно новые эффекты.

Установки распределенной генерации способны существенно изменять профиль напряжения вдоль распределительных линий. Если в традиционной схеме напряжение монотонно снижается по мере удаления от питающего центра, то при наличии распределенной генерации картина становится неоднородной: в узлах подключения источников могут возникать локальные

повышения напряжения, особенно в периоды низкой нагрузки и высокой генерации [3].

Существующая в России централизованная система регулирования режимных параметров, ориентированная на поддержание заданных уровней напряжения в контрольных точках распределительной сети, не обеспечивает достаточной эффективности в условиях высокого проникновения распределенной генерации. Традиционные способы компенсации реактивной мощности с помощью шунтирующих конденсаторных батарей оказываются недостаточно гибкими для динамического реагирования на быстрые изменения генерации возобновляемых источников.

### **Технологические решения регулирования напряжения в сетях с распределенной генерацией**

Для повышения эффективности работы энергосистемы и снижения потерь активной мощности производится оптимизация режимов по реактивной мощности. В российской практике прослеживается переход от централизованных систем регулирования к активно-адаптивным сетям с применением управляемых устройств компенсации реактивной мощности [4]. Эти устройства определяют адаптивные свойства системы и позволяют динамически реагировать на изменения режимов.

Применение силовой электроники открывает новые возможности для регулирования напряжения в распределительных сетях с высоким проникновением распределенной генерации. Устройства FACTS демонстрируют высокую эффективность в задачах компенсации реактивной мощности и стабилизации уровней напряжения. Современные преобразователи на IGBT-транзисторах, используемые в составе установок распределенной генерации, могут функционировать в качестве статических компенсаторов реактивной мощности и динамических восстановителей напряжения [5].

Впрочем, реализация этих возможностей требует наличия достаточной резервной мощности преобразователей, что не всегда обеспечивается в существующих установках. Большинство современных преобразователей распределенной генерации оптимизированы для выдачи активной мощности и имеют ограниченные возможности по генерации или потреблению реактивной мощности.

Альтернативой традиционному централизованному регулированию выступает децентрализованная система мультиагентного типа. Мультиагентное регулирование обеспечивает компромиссное напряжение в электрических сетях за счет использования каждым регулятором единых правил поведения с контролем режима прилегающего района сети [6]. Эта технология реализуется в специальных устройствах управления спросом на электроэнергию (DSM – Demand Side Management).

Принцип координации локальных агентов источников мощности по типу «аукцион» позволяет определять управляющие воздействия на основе чувствительности напряжений в узлах электрической сети к инъекциям мощности. Интеграция в программных продуктах компонентов системной динамики и поведения агентов позволяет целостно моделировать систему мультиагентного управления напряжением [7].

Прогностические регуляторы напряжения и частоты для установок распределенной генерации показывают существенное улучшение показателей качества процесса управления. При подключении дополнительной нагрузки в изолированной системе электроснабжения групповое прогностическое регулирование позволяет снизить максимальный провал напряжения в 1,75 раза по сравнению с локальным прогностическим регулированием и в 3,5 раза – по сравнению с обычными регуляторами [8]. Время переходного процесса скорости вращения ротора синхронного генератора при использовании прогностических регуляторов уменьшается в три раза.

## **Влияние распределенной генерации на показатели качества электроэнергии и устойчивость системы**

Воздействие распределенной генерации на качество электрической энергии проявляется по нескольким направлениям – в первую очередь через изменение уровней напряжения, гармонические искажения и несимметрию. Результаты исследований, выполненных на материале систем электроснабжения железных дорог, демонстрируют, что включение установки распределенной генерации номинальной мощности позволяет уменьшить коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения на 7,2% на шинах распределительного пункта и примерно на 1% на шинах тяговой подстанции [9].

Коэффициент несимметрии по обратной последовательности при номинальной мощности установки распределенной генерации снижается на 1% на шинах тяговой подстанции и почти вдвое – на распределительном пункте. Минимальные значения исследуемых параметров достигаются после включения в сеть высоковольтного синхронного генератора при генерировании чисто активной мощности.

Внедрение источников распределенной генерации уменьшает ток, протекающий через линию электропередачи, сокращая тем самым активные и реактивные потери мощности. Расчет показателя уменьшения потерь мощности (РУПМ) позволяет оценить эффективность установки распределенной генерации: при  $РУПМ < 1$  подключение распределенной генерации обеспечивает снижение потерь, при  $РУПМ = 1$  эффект отсутствует, при  $РУПМ > 1$  потери возрастают [10]. Этот показатель определяет оптимальное местоположение установки распределенной генерации для минимизации потерь мощности и стоимости потерь электроэнергии.

Коэффициент улучшения качества напряжения (КН), рассчитываемый как отношение характерного параметра напряжения в узлах системы при интеграции распределенной генерации к параметру без интеграции, служит

эффективным критерием оценки. При значениях  $KH > 1$  фиксируется улучшение качества напряжения, при  $KH = 1$  изменения отсутствуют, при  $KH < 1$  происходит ухудшение [10].

Распределенная генерация оказывает положительное влияние на устойчивость энергосистемы при условии применения адаптивных систем управления. Результаты моделирования изолированных систем электроснабжения с турбогенераторными установками, ветрогенераторами и накопителями электроэнергии показывают, что автопрогностические регуляторы скорости ротора генератора и системы управления накопителями обеспечивают устойчивость и живучесть системы, повышая ее демпферные свойства [11].

Согласованное управление накопителями электроэнергии и установками распределенной генерации с прогностическими регуляторами снижает практически до нуля величину перерегулирования скорости ротора и почти на 90% уменьшает время переходного процесса [12]. При трехфазном коротком замыкании групповые прогностические регуляторы позволяют в 1,5 раза уменьшить время переходного процесса и в 2,3 раза – величину перерегулирования для частоты в сети.

### **Интеллектуальные энергетические системы и перспективы развития технологий регулирования**

Переход к интеллектуальным энергетическим системам (Smart Grid) представляет собой ключевое направление модернизации российской электроэнергетики в условиях массового внедрения распределенной генерации. Интеллектуальная энергетическая система на основе цифровых технологий обеспечивает мониторинг, управление и оптимизацию производства, распределения и потребления электроэнергии в режиме реального времени [13].

Ключевые особенности Smart Grid включают самоадаптацию, активное взаимодействие с потребителями, интеграцию децентрализованных

источников энергии и высокий уровень информационной безопасности. В России реализуется программа цифровой трансформации электросетевого комплекса под руководством ПАО «Россети», в рамках которой внедряются пилотные проекты «Цифровой РЭС», цифровые подстанции и интеллектуальные системы учета [14].

Децентрализация производства электроэнергии и широкое распространение распределенной генерации обусловлены ростом тарифов на технологическое присоединение, небольшими сроками ввода в эксплуатацию, возможностью решения проблемы утилизации попутного нефтяного газа, развитием розничных рынков электроэнергии. В России распределенная генерация – это, как правило, когенерация на различных видах топлива. Наличие распределенной генерации существенно изменяет схемно-режимные свойства электроэнергетических систем [15].

Применение традиционных технологий планирования и управления режимами в электрических сетях с распределенной генерацией нецелесообразно, поскольку они базируются на цифровой модели, отражающей топологию сети и параметры всех элементов, что ведет к росту размерности решаемых задач и усложнению системы управления. Разработка и внедрение целого комплекса новых технологий становится необходимым условием для интеграции распределенной генерации в существующие электроэнергетические системы.

Холонический подход в концепции Smart Grid предполагает построение интеллектуальной системы как совокупности холонов – подсистем различной природы, состоящих во взаимосвязи и способных создавать новые объединения путем агрегирования на более высоком уровне. Генерирующий потребитель-холон обладает способностью самостоятельно генерировать энергию с помощью возобновляемых источников, аккумулировать ее и обмениваться энергией с другими подобными холонами и основной генерирующей системой [16].

Функции холонов сосредоточены на фундаментальных, прикладных и новых применениях: поддержка электромобилей, распределенная генерация, технология управления информацией и конфиденциальностью. Холоническая структура обеспечивает автономию генерирующих потребителей, динамическую реконфигурацию на основе методов искусственного интеллекта и информационных технологий.

Локальные интеллектуальные энергосистемы на основе когенерационных источников малой мощности и распределительных сетей среднего и низкого напряжения создают сбалансированную структуру. Интеграция таких систем с региональными энергосистемами обеспечивает значимые системные эффекты: повышение бесперебойности электроснабжения, управляемости, устойчивости и долговечности оборудования [17].

### **Заключение**

Распределенная генерация оказывает комплексное влияние на процессы регулирования напряжения в современных электрических сетях, создавая одновременно новые возможности и технические вызовы. Результаты исследований подтверждают, что при малой степени проникновения распределенной генерации традиционные методы регулирования напряжения сохраняют работоспособность, однако при превышении пороговых значений требуется переход к качественно новым технологическим решениям.

Децентрализованные мультиагентные системы управления демонстрируют значительные преимущества по сравнению с централизованными подходами. Мультиагентное регулирование обеспечивает компромиссное решение, учитывающее интересы различных субъектов – распределительных компаний, потребителей и владельцев генерирующих источников. Оптимальный режим напряжения, достигаемый с помощью децентрализованного управления, близок к результату глобальной

оптимизации, при этом увеличивается пропуск электроэнергии по сети без требования полной наблюдаемости.

Прогностические регуляторы напряжения и частоты для установок распределенной генерации обеспечивают существенное улучшение динамических характеристик системы. Групповое прогностическое управление позволяет снизить провалы напряжения до 3,5 раз и уменьшить время переходных процессов в три раза по сравнению с обычными регуляторами. Согласованное управление накопителями электроэнергии и генерирующими установками с прогностическими регуляторами практически устраняет перерегулирование и сокращает время переходного процесса на 90%.

Влияние распределенной генерации на качество электроэнергии носит преимущественно положительный характер при условии правильной организации системы управления. Включение установок распределенной генерации приводит к снижению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения до 7,2% и уменьшению коэффициента несимметрии почти вдвое. Потери мощности в распределительных сетях снижаются в среднем не более чем на 40% после подключения распределенной генерации.

Переход к интеллектуальным энергетическим системам Smart Grid открывает перспективы для эффективной интеграции распределенной генерации в электрические сети. Холонический подход с формированием генерирующих потребителей-холонов, обладающих автономностью и способностью к динамической реконфигурации, обеспечивает гибкость и адаптивность системы. Локальные интеллектуальные энергосистемы на основе распределенной генерации повышают надежность электроснабжения, управляемость и устойчивость региональных энергосистем.

В российской практике накоплен существенный опыт интеграции распределенной генерации – совокупная установленная мощность возобновляемых источников энергии достигла 7,21 ГВт к началу 2026 года и

продолжает расти. Реализуются программы поддержки строительства объектов возобновляемой энергетики, формируется нормативная база для интеллектуальных энергетических систем, внедряются пилотные проекты цифровой трансформации электросетевого комплекса.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку методов оперативного определения запасов статической и динамической устойчивости в системах с высоким проникновением распределенной генерации, совершенствование алгоритмов мультиагентного управления с учетом неопределенности режимов работы возобновляемых источников, создание интегрированных систем управления спросом и предложением электроэнергии на основе технологий искусственного интеллекта. Особое внимание следует уделить вопросам информационной безопасности децентрализованных систем управления и стандартизации протоколов обмена данными между агентами.

#### **Использованные источники:**

1. Ассоциация развития возобновляемой энергетики. Статистика ВИЭ. URL: <https://rreda.ru/industry/statistics/> (дата обращения: 22.05.2026).
2. Влияние распределенной генерации на потери и качество электрической энергии / Cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-raspredelennoy-generatsii-na-poteri-i-kachestvo-elektricheskoy-energii> (дата обращения: 22.05.2026).
3. Групповые прогностические регуляторы напряжения и частоты для установок распределенной генерации / Cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gruppovye-prognosticheskie-regulyatory-napryazheniya-i-chastoty-dlya-ustanovok-raspredelennoy-generatsii> (дата обращения: 22.05.2026).
4. Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации / Cyberleninka.ru. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/intellektualnye-sistemy-upravleniya-ustanovkami-raspredelennoy-generatsii> (дата обращения: 22.05.2026).

5. Исследования и оценка эффективности повышения качества электроэнергии при интеграции распределенных генераций с системами электроснабжения на нескольких новых показателях / Cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-i-otsenka-effektivnosti-povysheniya-kachestva-elektroenergii-pri-integratsii-raspredelennyh-generatsiy-s-sistemami> (дата обращения: 22.05.2026).

6. Моделирование группового управления напряжением с источниками активной и реактивной мощности в электрических сетях / Cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-grupпового-upravleniya-napryazheniem-s-istochnikami-aktivnoy-i-reaktivnoy-moschnosti-v-elektricheskikh-setyah> (дата обращения: 22.05.2026).

7. Оптимизация уровней напряжения в активно-адаптивных сетях с распределенной генерацией / Cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-urovney-napryazheniya-v-aktivno-adaptivnyh-setyah-s-raspredelennoy-generatsiey> (дата обращения: 22.05.2026).

8. Показатели качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог с установками распределенной генерации / Cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pokazateli-kachestva-elektroenergii-v-sistemah-elektrosnabzheniya-zheleznyh-dorog-s-ustanovkami-raspredelennoy-generatsii> (дата обращения: 22.05.2026).

9. Построение холонической инфраструктуры интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid с учетом двустороннего потока энергии / Cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-holonicheskoy-infrastruktury-intellektualnyh-setey-v-kontseptsii-smart-grid-s-uchetom-dvustoronnego-potoka-energii> (дата обращения: 22.05.2026).

10. Технологическое решение проблемы регулирования напряжения в распределенной энергетике / Cyberleninka.ru. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskoe-reshenie-problemy-regulirovaniya-napryazheniya-v-raspredelennoy-energetike> (дата обращения: 22.05.2026).

11. Умные сети (Smart Grid): цифровая трансформация электроснабжения / Cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/umnye-seti-smart-grid-tsifrovaya-transformatsiya-elektrosnabzheniya> (дата обращения: 22.05.2026).

12. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Кижин В.В. Согласованное управление накопителями электроэнергии и установкой распределенной генерации с прогностическими регуляторами в системе электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 6. С. 3–13.

13. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 5. С. 184–194.

14. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Черепанов А.В. Оперативное определение запасов статической устойчивости в системах электроснабжения с установками распределенной генерации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 1. С. 31–43.

15. Чукреев Ю.Я. Интеграция локальных интеллектуальных энергосистем с региональными энергосистемами // Известия РАН. Энергетика. 2023. № 5. С. 3–15.