

УДК 621.311

Мясоедов Юрий Викторович, доцент, канд. тех. наук, Амурский государственный университет, г. Благовещенск

Долинский Даниил Александрович, магистрант, Амурский государственный университет, г. Благовещенск

**ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ В
УСЛОВИЯХ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ ГЕНЕРАЦИИ И
НАГРУЗОК**

В статье рассматриваются современные подходы к управлению уровнями напряжения в электрических сетях. Проведен анализ физических процессов, вызывающих отклонения напряжения, и предложена классификация методов регулирования. Выявлены актуальные проблемы обеспечения качества электроэнергии, связанные с эволюцией структуры генерирующих мощностей и внедрением потребителей с новыми характеристиками (ЦОД, нелинейные нагрузки, распределенная генерация). Выполнено сопоставление классических устройств (трансформаторы с РПН, конденсаторные батареи) и перспективных разработок (STATCOM, SVC, smart-инверторы) в области регулирования, а также алгоритмов их работы. Путем численного моделирования участка сети 10 кВ доказана более высокая эффективность быстродействующих статических компенсаторов. Рассмотрены действующие и перспективные нормативные требования (Постановления Правительства РФ № 1031, № 103). Определены главные направления технического развития и сформулированы практические рекомендации по оснащению сетей в зависимости от их специфики.

Annotation

The article examines modern approaches to voltage level management in electrical networks. An analysis of the physical processes causing voltage deviations is carried out, and a classification of regulation methods is proposed. Current problems in ensuring power quality are identified, related to the evolution of the

generating capacity structure and the integration of consumers with new characteristics (data centers, nonlinear loads, distributed generation). A comparison is made between classical devices (transformers with on-load tap changers (OLTC), capacitor banks) and advanced developments in the field of regulation (STATCOM, SVC, smart inverters), as well as their operating algorithms. Through numerical simulation of a 10 kV network section, the higher efficiency of high-speed static compensators is proven. Existing and future regulatory requirements (Decrees of the Government of the Russian Federation No. 1031, No. 103) are considered. The main directions of technical development are identified, and practical recommendations for equipping networks depending on their specific characteristics are formulated.

Ключевые слова: регулирование напряжения, качество электроэнергии, реактивная мощность, статком, трансформатор с РПН, распределенная генерация, интеллектуальные сети, устойчивость энергосистемы.

Keywords: voltage regulation, power quality, reactive power, STATCOM, transformer with РПН, distributed generation, smart grids, and power system stability.

Введение

Обеспечение нормативных параметров напряжения в узлах электроэнергетической системы является одной из ключевых задач, влияющих как на надежность работы оборудования, так и на экономическую эффективность передачи электроэнергии. В соответствии с приказом Минэнерго России от 12.07.2018 № 548, допустимые уровни напряжения строго регламентированы для различных типов оборудования и контрольных пунктов [1].

Однако в последнее десятилетие условия работы систем регулирования претерпели кардинальные изменения. Появление новых типов нагрузок (центры обработки данных с пульсирующим потреблением, нелинейные преобразователи), активное внедрение распределенной генерации, а также изменение режимов работы традиционных электростанций создают динамические возмущения, с которыми классические средства регулирования

справляются с трудом. Целью научной статьи является анализ физических основ регулирования, сравнительная оценка традиционных и инновационных методов, а также выработка рекомендаций по выбору эффективных технических решений в современных условиях.

1. Физические принципы изменения напряжения и классификация методов

Уровень напряжения в узлах энергосистемы не остается постоянным, а непрерывно меняется вслед за колебаниями нагрузок и конфигурацией сети. Корень этих изменений кроется в потере напряжения на элементах сети при передаче мощности. Протекание тока I по проводникам с активным R и индуктивным X сопротивлением приводит к падению напряжения, приближенно описываемому формулой:

$$\Delta U = (P \cdot R + Q \cdot X) / U, (1)$$

где P и Q – активная и реактивная мощности нагрузки.

Особенно заметно это явление в распределительных сетях, где потребители на удалении от питающего центра находятся в заведомо худших условиях. Ключевую роль в поддержании напряжения играет баланс реактивной мощности в узле. Избыток реактивной мощности ведет к росту напряжения, тогда как дефицит вызывает его падение. Следовательно, управление потоками реактивной энергии – основной физический инструмент воздействия на напряжение.

По своему физическому воздействию все методы регулирования можно разделить на две основные категории:

Продольное регулирование (изменение свойств сети): изменение коэффициента трансформации (трансформаторы с РПН, ПБВ); изменение реактивного сопротивления линии (установки продольной компенсации); изменение топологии сети.

Поперечное регулирование (воздействие на реактивную мощность): изменение режима возбуждения синхронных машин; использование статических источников реактивной мощности.

С точки зрения охвата сети, различают централизованное и локальное регулирование. По закону изменения во времени применяют встречное (повышение в пик), согласованное (постоянный уровень) и стабилизацию напряжения.

2. Современные вызовы в обеспечении качества напряжения

Трансформация энергетики порождает проблемы, с которыми традиционные средства регулирования зачастую не справляются:

Новые категории потребителей: Вычислительные центры создают резкопеременную нагрузку; преобразовательная техника генерирует высшие гармоники, искажая синусоидальность; массовое использование однофазных устройств приводит к перекосам фаз.

Режимы работы генерации: Необходимость компенсировать неравномерность потребления заставляет генераторы часто менять режим возбуждения, что ускоряет износ.

Распределенная генерация: Реверсивные перетоки мощности приводят к тому, что напряжение в конце линии может превышать напряжение в центре питания.

Ограниченность классических решений: Трансформаторы с РПН обладают инерционностью (время реакции – секунды), а их механические компоненты подвержены быстрому износу при частых срабатываниях.

3. Сопоставительный анализ технических средств и алгоритмов управления

В таблице 1 приведено сравнение характеристик устройств регулирования разных поколений.

Таблица 1 – Сравнение технических средств регулирования напряжения

Параметр	Традиционные средства	Инновационные средства
----------	-----------------------	------------------------

Типы устройств	Трансформаторы с РПН, батареи конденсаторов, синхронные компенсаторы	STATCOM, SVC, D- STATCOM, smart- инверторы, накопители энергии (BESS)
Принцип действия	Механическое переключение или изменение возбуждения	Полупроводниковая коммутация (IGBT, тиристоры)
Быстродействие	0,5 – 5 с (РПН)	1 – 10 мс
Точность	Ступенчатое, погрешность 1–2%	Плавное, погрешность < 0,5%
Ресурс	Механический износ	Практически неограниченный

Продолжение таблицы 1

Параметр	Традиционные средства	Инновационные средства
Применение	Плавные суточные изменения нагрузки	Быстрые динамические возмущения, фликер

Сравнительная характеристика алгоритмов управления представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение алгоритмов управления

Характеристика	Традиционные алгоритмы	Инновационные алгоритмы
Тип управления	Локальное, ПИД по отклонению	Распределенное (MPC), нейросети, обучение с подкреплением
Входные данные	U и I на шинах	PMU, SCADA, прогнозы погоды и нагрузки
Адаптивность	Низкая	Высокая
Примеры	Встречное регулирование	Координация STATCOM и РПН [4], DRL-регуляторы [3]

4. Количественная оценка эффективности (численный эксперимент)

Для демонстрации различий в работе традиционных и инновационных средств выполним расчет для участка сети 10 кВ (рисунок 1, схематично). Параметры линии: $R = 0,5$ Ом, $X = 1,2$ Ом. В исходном режиме нагрузка составляет $S = 5$ МВА ($\cos\varphi = 0,8$). В момент времени $t^* = 0$ производится пуск короткозамкнутого двигателя с пусковым током 6 кА ($\cos\varphi = 0,3$).

Уровень напряжения без регулирования:

Рассмотрим фрагмент распределительной сети напряжением 10 кВ. Параметры:

- Линия электропередачи: активное сопротивление $R = 0,5$ Ом, индуктивное $X = 1,2$ Ом.
- Базовая нагрузка: $S = 5$ МВА, $\cos\varphi = 0,8$ ($P = 4$ МВт, $Q = 3$ Мвар).
- В момент $t = 0$ происходит пуск мощного асинхронного двигателя, кратно увеличивающий ток. Пусковой ток двигателя составляет 6 кА

при $\cos \varphi = 0,3$ ($P_{\text{пуск}} \approx 1,8$ МВт, $Q_{\text{пуск}} \approx 5,7$ Мвар). Суммарная нагрузка в момент пуска: $P_{\text{сум}} = 4 + 1,8 = 5,8$ МВт, $Q_{\text{сум}} = 3 + 5,7 = 8,7$ Мвар.

Падение напряжения без регулирования

Напряжение в узле нагрузки до возмущения принимаем $U_{\text{ном}} = 10$ кВ.

Падение напряжения в линии определяется приближенной формулой:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$$

До пуска:

$$\Delta U_0 = \frac{4 \cdot 0,5 + 3 \cdot 1,2}{10} = \frac{2 + 3,6}{10} = 0,56 \text{ кВ}(5,6\%)$$

Напряжение на нагрузке:

$$U_0 = 10 - 0,56 = 9,44 \text{ кВ}(94,4\%)$$

В момент пуска:

$$\Delta U_1 = \frac{5,8 \cdot 0,5 + 8,7 \cdot 1,2}{10} = \frac{2,9 + 10,44}{10} = 1,334 \text{ кВ}(13,34\%)$$

Напряжение проседает до:

$$U_1 = 10 - 1,334 = 8,666 \text{ кВ}(86,7\%)$$

Такое глубокое падение (ниже $0,95 \cdot U_{\text{ном}}$) недопустимо по ГОСТ (нижняя граница обычно $0,95 U_{\text{ном}}$ для 10 кВ). Требуется регулирование.

Регулирование с помощью РПН трансформатора

Предположим, питающая подстанция оснащена трансформатором с РПН, имеющим диапазон регулирования $\pm 9 \times 1,5\%$ (ступень 150 В на стороне 10 кВ). Время срабатывания одной ступени (измерение + механическое переключение) составляет около 3 секунд. Алгоритм РПН обычно реагирует на интегральное отклонение, игнорируя кратковременные провалы, чтобы избежать износа.

Через 3 секунды после начала пуска (когда двигатель уже вышел на номинальный режим, но провал все еще значителен) РПН переключит ступень и повысит напряжение на 150 В (1,5%). Новое напряжение:

$$U_{\text{РПН},1} = 8,666 + 0,15 = 8,816 \text{ кВ}$$

Этого недостаточно. Потребуется несколько переключений. Допустим, провал длится 5 секунд (пока двигатель разгоняется). За это время РПН успеет сделать не более 2 переключений, подняв напряжение до $\sim 8,966$ кВ (89,7%), что все еще ниже нормы. После окончания пуска напряжение восстановится, и РПН, возможно, вернется в исходное положение, совершив лишние переключения. Механический ресурс РПН ограничен (порядка 500 000 переключений), частое срабатывание сокращает срок службы.

Итог для РПН: регулирование запаздывает, ступенчатое, неспособно быстро компенсировать динамический провал.

Регулирование с помощью STATCOM

Установим в узле нагрузки STATCOM мощностью ± 3 Мвар (типичное значение для таких сетей). STATCOM способен за миллисекунды генерировать или потреблять реактивную мощность, изменяя напряжение в точке подключения.

Необходимая добавка напряжения для возврата к допустимому уровню (хотя бы $0,95 \cdot U_{\text{ном}} = 9,5$ кВ):

$$\Delta U_{\text{треб}} = 9,5 - 8,666 = 0,834 \text{ кВ}$$

Известно, что изменение напряжения от реактивной мощности STATCOM в узле можно оценить:

$$\Delta U \approx \frac{X_{\text{экв}} \cdot \Delta Q}{U}$$

где $X_{\text{экв}}$ — эквивалентное сопротивление сети относительно узла (в данном случае X линии = 1,2 Ом). Тогда:

$$\Delta Q = \frac{\Delta U \cdot U}{X_{\text{экв}}} = \frac{0,834 \cdot 8,666}{1,2} \approx 6,02 \text{ Мвар}$$

Но STATCOM имеет мощность только 3 Мвар. Он не может полностью устранить провал, но способен значительно его уменьшить. При выдаче 3 Мвар реактивной мощности:

$$\Delta U_{\text{STAT}} = \frac{1,2 \cdot 3}{8,666} \approx 0,415 \text{ кВ}$$

Напряжение поднимется до:

$$U_{STAT} = 8,666 + 0,415 = 9,081 \text{ кВ}(90,8\%)$$

Это все еще ниже нормы, но улучшение существенное. Однако STATCOM может работать совместно с РПН: быстрая компенсация STATCOM уменьшает глубину провала, а РПН затем медленно доводит напряжение до нормы. Время реакции STATCOM — около 20 мс (менее одного периода сети), так что провал будет скорректирован практически мгновенно. Провал сглаживается практически мгновенно (менее 20 мс). Динамика процессов отражена на рисунке 1.

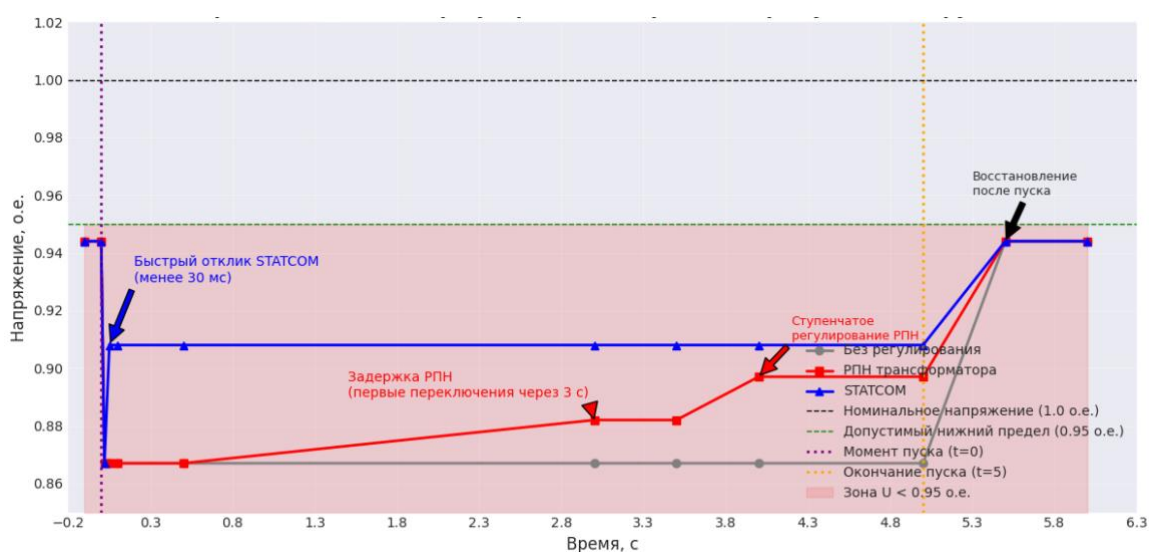


Рисунок 1 – Сравнение динамики регулирования напряжения при пусковой нагрузке

Результаты численного эксперимента подтверждают, что STATCOM обеспечивает более чем 100-кратное преимущество в быстродействии по сравнению с РПН.

5. Анализ нормативной базы

Нормативно-правовая база РФ в 2026 году претерпевает корректировки, призванные учесть реалии развивающейся энергосистемы:

Постановление Правительства РФ № 1031 от 09.07.2025 вводит дифференцированные коэффициенты запаса устойчивости по напряжению (0,15 для нормальных режимов, 0,10 для послеаварийных) и требование непрерывного автоматизированного мониторинга [2].

Постановление Правительства РФ № 103 от 07.02.2026 вводит четвертую категорию надежности для объектов с нечувствительностью к кратковременным перерывам питания.

Проект приказа Минэнерго (2025 г.) предлагает внедрение методики расчета показателей надежности, отдельно для каждого класса напряжения (ВН, СН1, СН2, НН).

Основные тенденции: повышение требований к мониторингу, градуация показателей качества по уровням напряжения и категориям потребителей, законодательная адаптация к новым типам нагрузок.

6. Перспективные векторы развития и рекомендации

Основные направления технического прогресса:

1. Цифровизация и интеллектуализация сетей: встраивание регуляторов в SCADA/IoT, применение алгоритмов прогнозирования.
2. Совершенствование силовой электроники: повышение надежности полупроводниковых преобразователей.
3. Интеграция с системами накопления энергии (BESS): создание гибридных комплексов для парирования пиков активной мощности.
4. Эволюция алгоритмов: внедрение MPC и нейросетевых технологий [3, 4].

Практические рекомендации:

- Городские сети: гибридные схемы (РПН для глубокого регулирования + STATCOM для быстрых процессов) + цифровой мониторинг.
- Сельские сети: линейные регуляторы (бустеры) с телемеханикой.
- Сети с ВИЭ: smart-инверторы с сеткообразующими функциями (grid-forming).
- Промпредприятия: быстродействующие STATCOM и активные фильтры.
- Особо чувствительные объекты: системы on-line UPS с двойным преобразованием.

Проведенный анализ и численные расчеты подтверждают необходимость смены парадигмы в управлении напряжением: переход от пассивного поддержания параметров к активному, упреждающему управлению на основе комплексирования быстродействующих устройств силовой электроники и интеллектуальных алгоритмов. Выбор конкретных технических решений должен быть строго дифференцирован, учитывать специфику участка сети и характер подключенных потребителей.

Список литературы

1. Приказ Минэнерго России от 12.07.2018 № 548 «Об утверждении требований к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок».
2. Постановление Правительства РФ от 09.07.2025 № 1031 «О внесении изменений в Правила технологического функционирования электроэнергетических систем».
3. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети : учебник для вузов / В. И. Идельчик. — Москва : Энергоатомиздат, 1989. — 592 с. — ISBN 5-283-01012-0.
4. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии : руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. — Москва : ЭНАС, 2009. — 456 с. — ISBN 978-5-4245-0005-1.
5. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах : учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В. А. Веников. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва : Высшая школа, 1985. — 536 с.
6. Карташов, И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения: способы его обеспечения / И. И. Карташов. — Москва : Издательство МЭИ, 2012. — 360 с. — ISBN 978-5-383-00777-0.

References

1. Ministry of Energy of the Russian Federation. Order No. 548 dated July 12, 2018 "On Approval of Requirements for Ensuring the Reliability of Electric Power Systems, Reliability and Safety of Electric Power Industry Facilities and Power Receiving Installations".
2. Government of the Russian Federation. Resolution No. 1031 dated July 09, 2025 "On Amendments to the Rules for the Technological Functioning of Electric Power Systems".
3. Idelchik, V. I. Electric Systems and Networks: Textbook for Universities. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 592 p. ISBN 5-283-01012-0.
4. Zhelezko, Yu. S. Electricity Losses. Reactive Power. Power Quality: A Guide for Practical Calculations. Moscow: ENAS, 2009. 456 p. ISBN 978-5-4245-0005-1.
5. Venikov, V. A. Transient Electromechanical Processes in Electric Power Systems: Textbook for Electric Power Engineering Specialties of Universities. 4th ed., revised and supplemented. Moscow: Vysshaya Shkola, 1985. 536 p.
6. Kartashov, I. I. Power Quality in Power Supply Systems: Methods of Its Ensuring. Moscow: MPEI Publishing House, 2012. 360 p. ISBN 978-5-383-00777-0.