

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ПОТЕРЬ

А.Д. Царегородцев, магистр
Амурский государственный университет
(Россия, г. Благовещенск)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-5-1-395-400

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме оптимизации установившихся режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) с целью минимизации технических и коммерческих потерь. Рассматривается трансформация подходов к управлению в условиях гетерогенности сетевой структуры, обусловленной интеграцией стохастических возобновляемых источников энергии и активным поведением потребителей. Авторами проанализированы методы топологической оптимизации кольцевых распределительных сетей, а также возможности применения средств гибких систем передачи переменного тока (FACTS), в частности фазопоротных трансформаторов. В работе обоснован переход от классических градиентных методов к интеллектуальным системам управления, базирующимся на глубоких нейронных сетях и эвристических алгоритмах. Систематизированы методы решения частных сетевых задач в рамках единой многоуровневой системы координации режимов, обеспечивающей функционирование в темпе технологического процесса. Уделено внимание вопросам киберустойчивости распределенных систем интеллектуального управления и математическому моделированию несанкционированного отбора энергии. По мнению авторов, именно синергетический эффект от совместного использования топологических преобразований, технических средств FACTS и интеграции систем накопления электрической энергии (BESS), а также интеллектуальных алгоритмов является безальтернативным вектором повышения энергетической эффективности, превентивного реагирования на флуктуации параметров и обеспечения живучести современных сложнозамкнутых сетей.

Ключевые слова: электроэнергетическая система; оптимизация режимов; минимизация потерь; возобновляемые источники энергии; искусственный интеллект; киберустойчивость.

Современный этап функционирования магистральных и распределительных электросетевых комплексов характеризуется ростом технологической гетерогенности. Происходит усложнение конфигурации генерирующих мощностей, вызванное масштабной интеграцией объектов распределенной генерации, требующее пересмотра классических детерминированных подходов к диспетчерскому управлению. Возникают новые классы задач. Традиционные алгоритмы расчета токораспределения, опирающиеся на уравнения установившегося режима в форме баланса мощностей, обнаруживают ограниченную применимость в условиях стохастического характера выдачи мощности ветровыми и солнечными электростанциями. Нелинейный характер уравнений узловых напряжений затрудняет поиск глобального экстремума целевой функции снижения технических потерь, трансформируя стандартную процедуру оптимизации в

многокритериальную задачу нелинейного программирования с жесткими ограничениями в виде неравенств.

Параметры потокораспределения постоянно флуктуируют. Для компенсации возникающих небалансов, обусловленных как естественной неравномерностью графиков нагрузки, так и спецификой функционирования потребителей с активным поведением (просьюмеров), необходим поиск новых управляющих воздействий. Подходы к оптимизации установившихся режимов в контурах с возобновляемыми источниками энергии требуют применения комплексных критериев эффективности, учитывающих не только вектор продольных и поперечных потерь мощности в ветвях схемы замещения, но и динамические характеристики регулирующих органов [1, с. 35]. Физические законы электротехники накладывают ограничения.

Особое аналитическое значение приобретает разделение потерь на составляющие. Наряду со стандартными нагрузочными (техническими) потерями, локализованными в проводниках линий электропередачи и обмотках трансформаторного оборудования, существенную долю в балансе составляют потери коммерческого характера. Расчет токов и напряжений при фиксации фактов несанкционированного отбора электрической энергии из распределительных сетей сопряжен с высокой степенью неопределенности, вызванной отсутствием легитимных средств телеизмерения в точках незаконных подключений [7, с. 133]. Проблема требует междисциплинарного анализа. Математический аппарат теории графов, совмещенный с методами правовой квалификации безучетного потребления, позволяет сформировать расчетные модели, описывающие топологические изменения структуры сети при возникновении неучтенных токовых нагрузок в узлах.

Полагаем необходимым разделять алгоритмы оптимизации по критерию временного интервала управления на оперативные, краткосрочные и перспективные. Фокусирование внимания исключительно на технологической составляющей без учета погрешностей приборов учета искажает общую картину эффективности режимов.

Рассматривая кольцевые распределительные сети, часто эксплуатируемые в разомкнутом режиме для снижения токов короткого замыкания, следует отметить проблему выбора оптимальных точек потокооразделения. Принудительное распределение потоков активной и реактивной мощности в замкнутых контурах неоднородной структуры (где отношение активного сопротивления к реактивному существенно различается для разных участков) приводит к появлению уравнивающих токов, значительно увеличивающих суммарный нагрев проводников. Оптимизация режима работы подобных систем по минимуму потерь электрической энергии достигается путем математического моделирования топологических преобразований, включающих

обоснованное размыкание сети в узлах с минимальными значениями токов перетока [5, с. 42]. Задача сводится к дискретному программированию. Специфика топологии диктует выбор методов.

Применение гибких систем передачи переменного тока (FACTS) открывает новые возможности регулирования. Использование фазооборотных трансформаторов, обеспечивающих введение регулируемой продольно-поперечной добавочной ЭДС в расщелку линии, позволяет принудительно перераспределять потоки мощности в обход перегруженных или неоднородных сечений, снижая тем самым суммарные потери в замкнутых энергообъединениях [4, с. 249]. Магнитное насыщение сердечников ограничивает диапазон. Наблюдается синергетический эффект при совместном использовании фазосдвигающих устройств и средств поперечной компенсации реактивной мощности (статических тиристорных компенсаторов, СТК), размещаемых в центрах тяжести нагрузок.

Динамика изменения параметров современных энергосистем исключает ручное управление. По нашему мнению, внедрение автоматизированных систем распределенного управления является безальтернативным вектором снижения издержек при транспортировке энергии.

Математическая эволюция подходов к расчету оптимальных режимов демонстрирует отчетливый переход от классических градиентных методов и квадратичного программирования к эвристическим и стохастическим процедурам. Сравнительный анализ эволюции концепций оптимизации сложных систем указывает на постепенное вытеснение жестких детерминированных моделей алгоритмами, способными функционировать в условиях неполноты исходной топологической и режимной информации [3, с. 32].

Для наглядного сопоставления ключевых технологических вызовов и предлагаемых научно обоснованных инструментов их нивелирования нами систематизированы основные параметры оптимизации сетевых режимов.

Таблица 1. Систематизация сетевых проблем и усовершенствованных методов минимизации потерь [1, 4-7]

Выявленная технологическая или методическая проблема	Инструмент оптимизации (авторская научная новизна)	Ожидаемый системный эффект в рамках энергосистемы
Стохастический характер генерации возобновляемых источников и нелинейность уравнений узловых напряжений	Многокритериальные алгоритмы нелинейного программирования с динамическими ограничениями	Повышение точности балансировки, минимизация продольных и поперечных потерь мощности
Наличие несанкционированного отбора энергии и высокая неопределенность в точках коммерческого учета	Математическое моделирование на основе теории графов с фиксацией топологических изменений	Локализация очагов коммерческих потерь, верификация расчетных токов и напряжений в узлах
Возникновение уравнивающих токов в неоднородных кольцевых распределительных структурах	Алгоритмы топологического размыкания сети в оптимизированных точках минимального перетока	Снижение избыточного нагрева проводников, упорядочивание векторов токораспределения
Перегрузка магистральных сечений и неоптимальное естественное распределение мощностей	Принудительное перераспределение потоков путем интеграции фазоповоротных трансформаторов	Разгрузка критических сечений энергосистемы, снижение суммарного сопротивления транзита
Высокие риски кибервоздействий на каналы связи и потеря управляемости интеллектуальных систем	Децентрализованные алгоритмы интеллектуального управления с поузловой агрегацией данных	Обеспечение живучести и кибербезопасности контура управления в темпе технологического процесса

Сопоставление зафиксированных в таблице подходов указывает на необходимость перехода от изолированного решения частных сетевых задач к формированию единой многоуровневой системы координации режимов. По нашему мнению, синергетический эффект от совместного использования топологических преобразований и интеллектуальных эвристических алгоритмов позволяет не просто компенсировать локальные технологические возмущения, но и перевести процесс управления потерями на качественно новый уровень, обеспечивающий превентивное реагирование на флуктуации параметров.

Градиентные методы склонны к застреванию в локальных экстремумах. Данное обстоятельство (обусловленное высокой степенью нелинейности целевых функций и целевых ограничений) вынуждает исследователей обращаться к генетическим алгоритмам, методам роя частиц, а также к алгоритмам имитации отжига. Эвристики требуют значительных вычислительных затрат. В экономическом аспекте задержка в расчете оптимального режима на несколько минут может нивелировать весь эффект от снижения потерь.

Взаимодействие разнородных факторов, определяющих суммарную эффективность и величину потерь в современных сложносвязанных сетях, наглядно отражено на представленной ниже структурно-логической схеме разработанных усовершенствований.

Взаимодействие разнородных факторов, определяющих суммарную эффективность и величину потерь в современных сложносвязанных сетях, наглядно отражено на представленной ниже структурно-логической схеме разработанных усовершенствований.

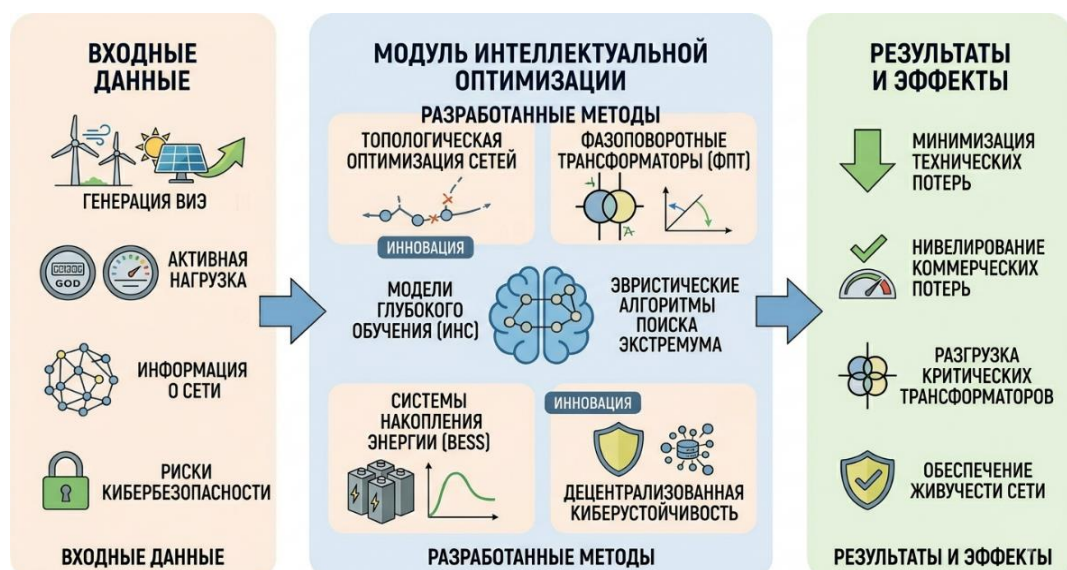


Рис. Структурно-логическая схема системы интеллектуальной оптимизации режимов ЭЭС с детализацией разработанных методов

Представленная архитектура демонстрирует, как разработанные авторами инструменты – от алгоритмов анализа графа сети для выявления коммерческих потерь [7] до моделей глубокого обучения для оперативного регулирования BESS и ФПТ [2, 4] – замыкаются на единый аналитический центр. По нашему мнению, именно такая многоконтурная визуализация позволяет проследить трансформацию разнородных режимных параметров в скоординированные управляющие сигналы, обеспечивающие комплексное и кибербезопасное снижение издержек при транспортировке электроэнергии.

Интеллектуализация систем управления становится ключевым фактором выживания энергетики. Применение концепций искусственного интеллекта, основанных на обучении искусственных нейронных сетей (ИНС) глубокого обучения, позволяет осуществлять прогнозирование электропотребления и мгновенную оптимизацию параметров режима в темпе процесса (on-line) за счет аппроксимации многомерных нелинейных зависимостей [2, с. 81]. Нейросети требуют репрезентативной выборки. Обучение ИНС на массивах данных телеметрии (SCADA/WAMS) обеспечивает формирование управляющих сигналов для исполнительных органов (РПН трансформаторов, статических компенсаторов) с минимальным временем отклика, предотвращая перегрузку линий.

Кибернетическая устойчивость систем при этом подвергается серьезным рискам. Устойчивость интеллектуальной энергосистемы, функционирующей в условиях непрерывного информационного обмена между агентами сети, напрямую зависит от надежности алгоритмов интеллектуального управления, способных парировать как схемно-режимные возмущения, так и деструктивные кибервоздействия на каналы связи [6, с. 149]. Информационная безопасность неотделима от технологической. Выход из строя ключевого узла агрегации данных ведет к лавинообразному развитию аварийной ситуации, сопровождающемуся потерей управляемости и резким ростом потерь из-за хаотического перетока мощности по неоптимальным траекториям.

Убеждены, что оценка эффективности оптимизационных мероприятий должна базироваться на сквозном аудите всех уровней напряжения (от 0,4 до 500 кВ), исключаящем

локальное улучшение показателей за счет ухудшения режимов смежных подсистем.

Рассматривая проблему комплексно, необходимо уделить внимание интеграции накопителей электрической энергии (BESS). Накопители сглаживают пики потребления. Аккумуляция избыточной энергии, генерируемой возобновляемыми источниками в периоды минимального спроса, с последующей выдачей в сеть во время максимума нагрузок уменьшает среднеквадратичный ток в линиях, что, согласно закону Джоуля-Ленца, пропорционально снижает переменные потери. Математическое описание работы систем накопления интегрируется в общую систему уравнений оптимизации в виде динамических ограничений по емкости и мощности заряда-разряда. Расчет усложняется из-за введения временной координаты (многоинтервальная оптимизация).

Управление режимами крупных энергообъединений наталкивается на проблему размерности. Разделение единой математической модели на децентрализованные подсистемы (декомпозиция по территориальному или функциональному признаку) позволяет решать локальные задачи оптимизации на уровне отдельных районов электрических сетей с последующей координацией решений на верхнем уровне диспетчерского управления. Метод Данцига-Вулфа демонстрирует здесь высокую эффективность. Локальная оптимизация учитывает региональную специфику. При этом глобальный минимум потерь достигается итерационным путем через корректировку граничных условий (напряжений и перетоков мощности в межсистемных связях).

Таким образом, снижение технологических и коммерческих потерь в современных электроэнергетических системах представляет собой комплексную научно-техническую задачу, требующую синтеза методов классической электротехники, теории оптимизации, искусственного интеллекта и кибербезопасности. Внедрение фазоповоротных устройств, алгоритмов топологического размыкания кольцевых структур и нейросетевых систем оперативного прогнозирования обеспечивает минимизацию потерь, повышая общую энергетическую эффективность и надежность функционирования энергосистем в условиях стохастической генерации.

Библиографический список

1. Домышев А.В. Оптимизация установившихся режимов электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками электроэнергии и активной нагрузкой / А.В. Домышев // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 4(45). – С. 34-39. – EDN SDASKM.
2. Ефимкин В.О. Применение искусственного интеллекта для оптимизации режимов в электроэнергетических системах / В.О. Ефимкин // День науки: Материалы XXXIII научной конференции Амурского государственного университета, Благовещенск, 18 апреля 2024 года. – Благовещенск: Амурский государственный университет, 2024. – С. 81-82. – EDN SEJKMQ.
3. Хафизов М.М. Методы анализа и оптимизации режимов сложных электроэнергетических систем: сравнительное исследование эволюции подходов / М.М. Хафизов // Инновации в науке и практике: Сборник научных статей по материалам XIX Международной научно-практической конференции, Уфа, 20 января 2026 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2026. – С. 31-35. – EDN GHAKCY.
4. Максименко О.О. Применение фазопоротных трансформаторов для оптимизации режимов работы электроэнергетических систем / О.О. Максименко, Е.С. Семина, А.И. Денисов, З.И. Чванов // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении : сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 11-12 апреля 2024 года. – Воронеж: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 248-251. – EDN TXYMGA.
5. Воронин А.Е. Оптимизация режима работы кольцевых распределительных сетей систем электроснабжения по минимуму потерь электрической энергии / А.Е. Воронин, Н.Е. Пешехонов, В.В. Рыбаков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2022. – № 681. – С. 40-45. – EDN QJYUBU.
6. Воропай Н.И. Устойчивость интеллектуальной энергосистемы и методы интеллектуального управления / Н.И. Воропай, Д.Н. Ефимов, В.Г. Курбацкий, Н.В. Томин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко, 91-е заседание семинара на тему «Методические и практические проблемы надежности систем энергетики», в 2-х книгах, Ташкент, 23–27 сентября 2019 года / Отв. ред. Н.И. Воропай. Том Выпуск 70 Книга 2. – Ташкент: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2019. – С. 147-156. – EDN DYROJT.
7. Семина Е.С. К вопросу расчета токов и напряжений при несанкционированных потерях электроэнергии / Е.С. Семина, О.О. Максименко, А.А. Слободскова, И.С. Никушкин // Электроэнергетика сегодня и завтра: сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Курск, 24 марта 2023 года / Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова; Научно-образовательный центр «Инженер». Том 2. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2023. – С. 132-135. – EDN ZFOXOO.

OPTIMIZATION OF ELECTRIC POWER SYSTEM MODES WITH MINIMIZATION OF LOSSES

A.D. Tsaregorodtsev, *Master's Degree*
Amur State University
(Russia, Blagoveshchensk)

Abstract. *The paper addresses the pressing issue of optimizing the steady-state operating conditions of electric power systems (EPS) to minimize both technical and commercial losses. It examines the transformation of control approaches amidst increasing topological heterogeneity, driven by the integration of stochastic renewable energy sources and the active behavior of consumers (prosumers). The authors analyze topological optimization methods for meshed distribution networks, alongside the potential application of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices, specifically phase-shifting transformers. The work substantiates the transition from classical gradient-based methods to intelligent control systems based on deep neural networks and heuristic algorithms. Methods for solving individual network optimization sub-problems within a unified, dynamic multi-level control coordination framework, operating in real-time with the technological process, are systematized. Due consideration is given to the cyber-resilience of decentralized intelligent control systems and the mathematical modeling of unauthorized energy off-take. The authors contend that the synergistic effect achieved by integrating topological transformations, FACTS and BESS technical solutions, and intelligent algorithms represents the only viable path forward to enhance energy efficiency, enable preemptive response to parameter fluctuations, and ensure the resilience and survivability of modern, complex, meshed power networks.*

Keywords: *electrical power system; regime optimization; loss minimization; renewable energy sources; artificial intelligence; cyber-resilience.*