Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы

1997 жылдан бастап шығады

ВЕСТНИК Торайгыров университета

Энергетическая серия

Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж
выдано
Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

---

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420

Бас редакторы – главный редактор
Талипов О. М.
доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора — Калтаев А.Г., *доктор PhD*
Ответственный секретарь — Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	*д.т.н., профессор*
Никифоров А. С.,	*д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н.,	*д.т.н., профессор*
Алиферов А. И.,	*д.т.н., профессор (Российская Федерация)*
Кошеков К. Т.,	*д.т.н., профессор*
Приходько Е. В.,	*к.т.н., профессор*
Кислов А. П.,	*к.т.н., доцент*
Нефтисов А. В.,	*доктор PhD*
Шерьязов С. К.	т.ғ.д., *профессор (Российская Федерация)*
Искакова З. С.	*технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 44.29.29

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/7-26

Т. М. Абылкаиров[1], А. Т. Бектимиров[2]

[1,2]Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева,
Республика Казахстан, г. Алматы;
[2]R&D Power Grid Automation,
Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2523-8513
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5609-6206
*e-mail: t.abylkairov@aues.kz

ОБЗОР МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ FACTS

В последние десятилетия стремительный рост спроса на электроэнергию привёл к эксплуатации электрических сетей в режимах, близких к предельно допустимым по пропускной способности, что сопровождается увеличением потерь мощности, снижению запасов устойчивости, а также снижением качества и надёжности электроснабжения. Устройства FACTS рассматриваются как один из наиболее эффективных инструментов повышения управляемости и эксплуатационной эффективности электроэнергетических систем.

Несмотря на значительный объём исследований, посвящённых применению устройств FACTS, существующая литература характеризуется фрагментарностью: различные работы используют несопоставимые целевые функции, неоднородные постановки задач и отличающиеся критерии оценки эффективности, что затрудняет системное сравнение результатов и формирование единых обобщённых выводов. Кроме того, отсутствует единый подход к классификации задач оптимизации с точки зрения их влияния на режимы работы энергосистем.

В настоящей статье предлагается систематизированный и критический обзор методов повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем с использованием устройств FACTS. В отличие от существующих работ, особое внимание уделено структурированной классификации подходов на основе целевых функций оптимизации. Проведён углублённый

сравнительный анализ, направленный на выявление сильных и слабых сторон различных методов оптимизации, а также их применимости в задачах различной размерности и сложности.

Научный вклад работы заключается в формировании единой рамочной классификации целевых функций оптимизации для задач размещения FACTS, выявлении ключевых методологических ограничений существующих подходов и определении перспективных направлений дальнейших исследований.

Ключевые слова: устройства FACTS, методы оптимизации, целевые функции оптимизации, метаэвристические алгоритмы, электроэнергетические системы.

Введение

Рост зависимости экономики от надёжности и качества электроснабжения, наряду с увеличением электрических нагрузок, привёл к эксплуатации электроэнергетических систем в режимах, близких к предельно допустимым по пропускной способности. Конкурентное давление на субъекты электроэнергетики, ориентированные на снижение стоимости электроэнергии, дополнительно усиливает загрузку сетевой инфраструктуры. При этом неравномерное распределение нагрузок в сети приводит к ухудшению профиля напряжения, росту потерь активной мощности и снижению запасов устойчивости, а также повышает чувствительность системы к коротким замыканиям.

В результате современные электроэнергетические системы сталкиваются с такими проблемами, как перегрузка линий электропередачи, отклонения напряжения от допустимых значений, увеличение потерь мощности и ухудшение динамической устойчивости системы. Для эффективного управления режимами и повышения пропускной способности сети без существенной реконструкции инфраструктуры широко применяются устройства FACTS [1].

Эффективность устройств FACTS в управлении режимами электроэнергетических систем подтверждена многочисленными исследованиями. Однако их высокая стоимость требует обоснованного выбора типа, мощности и места установки, поскольку неэффективные решения могут нивелировать экономический эффект. В этой связи применение методов оптимизации является ключевым условием обеспечения технико-экономической эффективности, направленным на оптимальное размещение устройств FACTS и повышение эффективности функционирования энергосистем.

В последние годы опубликовано множество обзоров по оптимальному размещению устройств FACTS, однако большинство из них ограничено отдельными целевыми функциями (устойчивость, потери, затраты). Комплексный подход, учитывающий совокупность целей оптимизации, по-прежнему отсутствует.

В работе представлен системный обзор целевых функций оптимизации размещения устройств FACTS. Предложена структурированная классификация по типам устройств, методам оптимизации и достигаемым эффектам, а также классификация методов по их характеристикам и ограничениям, что позволяет обоснованно выбирать тип FACTS и метод оптимизации в зависимости от задачи.

Материалы и методы

1 Классификация устройств FACTS и методов оптимизации

Рост нагрузок и требования к эффективности электроэнергетических систем, при высоких капитальных затратах на развитие сетей, приводят к перегрузкам, потерям, ухудшению профиля напряжения и снижению устойчивости. В этих условиях устройства FACTS широко применяются для повышения эффективности и управляемости режимов энергосистем.

Устройства FACTS условно делятся на два поколения: первое – на базе тиристорного управления (SVC, TCSC, TCPS), второе – на основе полностью управляемых полупроводников (GTO, IGBT), включающее STATCOM, SSSC, UPFC, IPFC и другие.

В зависимости от способа подключения к электроэнергетической системе устройства FACTS могут быть классифицированы на четыре основные категории, как показано на рисунке 1:

- Последовательные устройства FACTS;
- Параллельные устройства FACTS;
- Последовательно-последовательные устройства FACTS;
- Последовательно-параллельные устройства FACTS.

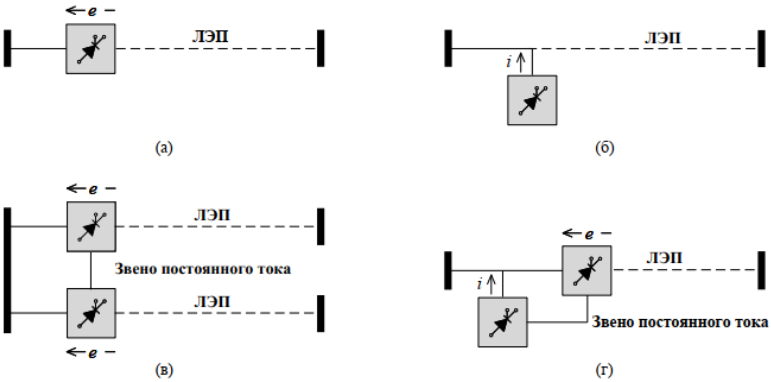


Рисунок 1 – Классификация устройств FACTS в зависимости от способа подключения к электроэнергетической системе. (а) последовательные; (б) параллельные; (в) последовательно-последовательные; (г) последовательно-параллельные

Высокая стоимость устройств FACTS требует оптимального выбора их типа, параметров и мест установки на основе методов оптимизации [2]. В зависимости от числа целей выделяют одноцелевые и многокритериальные методы; последние подразделяются на методы с доминированием и без него, где компромисс формируется на основе множества Парето-оптимальных решений. Методы оптимизации также могут быть классифицированы по этапам их развития на три основные группы: классические аналитические методы, классические алгоритмы математического программирования и современные метаэвристические алгоритмы, как показано на рисунке 2.

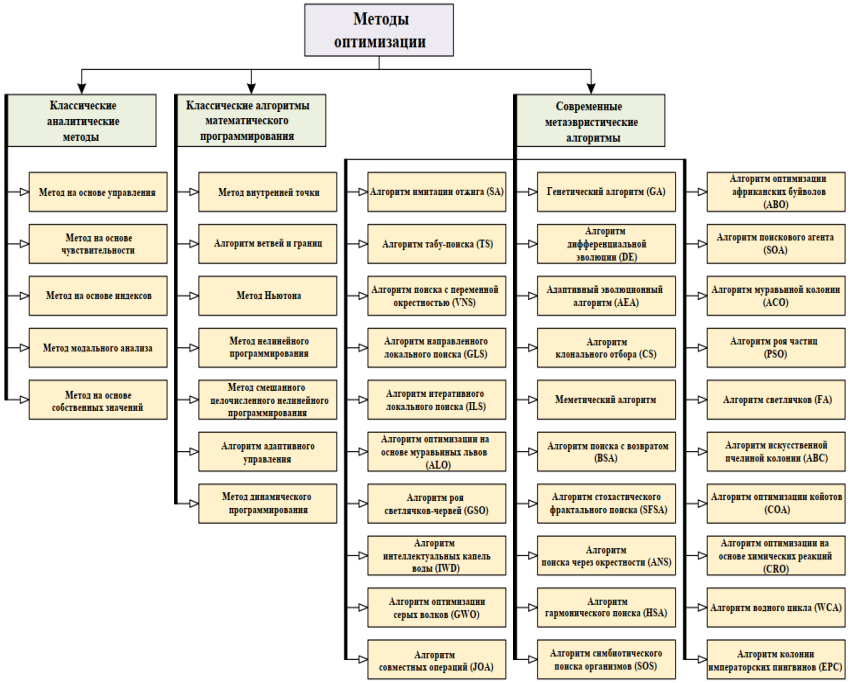


Рисунок 2 – Классификация методов оптимизации

Аналитические методы эффективны, но применимы к задачам малой размерности. Методы математического программирования обеспечивают сходимость, однако ограничены при большом числе ограничений. Метаэвристические алгоритмы наиболее универсальны и позволяют эффективно решать многокритериальные задачи с получением множества альтернативных решений.

2 Целевые функции оптимизации для повышения эффективности режимов работы электроэнергетических систем

К основным целям оптимизации относятся снижение перегрузок в сети, уменьшение потерь активной мощности, оптимизация затрат, повышение надёжности и устойчивости энергосистемы, улучшение профиля напряжения, повышение динамической устойчивости, обеспечение устойчивости частоты, оптимизация распределения реактивной мощности, а также снижение

выбросов парниковых газов. Указанные цели подробно рассмотрены в последующих подразделах.

2.1 Снижение перегрузок в сети

В условиях либерализованного рынка электроэнергии участники стремятся минимизировать затраты при обеспечении надёжного энергоснабжения, что усиливается ростом нагрузок и усложнением структуры сети. Подключение новых потребителей и источников генерации приводит к увеличению числа возможных аварийных и послеаварийных режимов, вследствие чего энергосистемы всё чаще эксплуатируются вблизи предельно допустимых по устойчивости и пропускной способности состояний.

Это сопровождается перегрузками линий, ростом потерь мощности, ухудшением показателей надёжности и ограничением передачи электроэнергии. В таких условиях требуется применение эффективных средств управления перетоками мощности и режимами работы сети.

Использование устройств FACTS и их оптимальное размещение позволяют повысить пропускную способность сети, улучшить управляемость режимов и снизить перегрузки. Благодаря высоким динамическим характеристикам устройства FACTS эффективно регулируют потокораспределение, обеспечивая повышение устойчивости и технико-экономической эффективности функционирования электроэнергетических систем.

В работе [3;4] предложен подход к снижению перегрузок в сети на основе оптимального размещения устройств SVC, TCSC, и UPFC с использованием методов собственных значений и чувствительности.

В работе [5] предложена многокритериальная постановка задачи снижения перегрузок, в которой основной целевой функцией является стоимость управления перегрузками, а дополнительными – показатели динамической устойчивости напряжения. Для оптимизации используется метод нелинейного программирования, а выбор компромиссного решения осуществляется на основе модифицированного ε-ограничения с последующей нечёткой оценкой.

2.2 Оптимизация затрат

Обеспечение требуемого уровня качества и надёжности электроснабжения при ограниченных затратах является сложной задачей. В условиях конкурентного рынка производители и потребители стремятся снизить стоимость электроэнергии при сохранении заданных показателей качества. Тарифы на электроэнергию напрямую влияют на себестоимость продукции и экономику в целом, что усиливает актуальность задач оптимизации затрат. Снижение стоимости электроэнергии повышает её доступность, стимулирует рост потребления и способствует социально-экономической устойчивости.

В ряде исследований снижение затрат достигается за счёт оптимального размещения устройств FACTS. В работе [6] метод чувствительности применяется для размещения последовательных устройств FACTS с целью снижения стоимости генерации и повышения пропускной способности сети. В [7] применяется гибридный подход, сочетающий методы биогеографической оптимизации и нелинейного программирования, для анализа экономической эффективности применения устройств TCSC и SVC.

В работе [8] генетические и гибридные алгоритмы (включая иммунный GA и PSO, а также алгоритм GRASP) используются для оптимального размещения FACTS с целью снижения затрат генерации и повышения надёжности.

В работе [9] исследуется влияние размещения устройств TCSC, SVC и UPFC на снижение инвестиционных затрат, загрузки линий и отклонений напряжения с использованием методов BBO, PSO и WIPSO.

2.3 Снижение потерь мощности

Потери активной мощности увеличивают затраты на производство электроэнергии и её удельную стоимость. При преобладании генерации на ископаемом топливе они также ведут к неэффективному использованию ресурсов и росту выбросов. Снижение потерь является ключевым фактором повышения энергоэффективности, экономической эффективности и экологической устойчивости энергосистем.

В ряде исследований задача минимизации потерь решается за счёт оптимального размещения устройств FACTS. В работе [10] для снижения потерь в установившемся режиме используются тиристорно-управляемые фазосдвигающие трансформаторы (TCPS) с применением метода модального анализа.

В работе [11] показано, что применение эволюционных и гибридных алгоритмов (включая ABC–DE, MFO, GWO) при размещении устройств TCSC, SVC и UPFC позволяет эффективно снижать потери активной мощности и отклонения напряжения. В [12] для минимизации потерь и затрат генерации используются различные метаэвристические алгоритмы (BMO, PSO, MPA, GSA, HBO, TLBO) с применением как шунтирующих (SVC), так и последовательных (TCSC, TCPS) устройств компенсации.

2.4 Повышение надежности и безопасности энергосистемы

Функционирование современных социально-экономических систем, включая критически важные объекты (например, системы здравоохранения) и цифровые сервисы, напрямую зависит от надёжности и безопасности электроснабжения. В этой связи обеспечение надёжности и устойчивости электроэнергетических систем является приоритетной задачей.

При проектировании и эксплуатации электрические сети формируются с учётом требований надёжности и критериев безопасности (в том числе по принципу N-1), обеспечивающих работоспособность системы при возникновении аварийных возмущений. Однако поддержание необходимых запасов устойчивости и надёжности в условиях ограниченных инвестиционных ресурсов представляет собой сложную задачу. Для повышения надёжности и управляемости режимов широко применяются устройства FACTS, при этом их эффективное использование требует оптимального выбора типа, параметров и мест установки на основе методов оптимизации.

В работе [13] рассматривается размещение TCSC с целью повышения статической и динамической устойчивости напряжения с использованием метода чувствительности. В работе [14] для повышения надёжности энергосистемы используется алгоритм гравитационного поиска (GSA) при размещении устройств TCSC, SVC и UPFC с учётом индексов безопасности, таких как отклонения напряжения и коэффициенты загрузки линий.

В работе [15] предложен подход на основе нелинейного программирования для разработки корректирующих воздействий, направленных на повышение динамической устойчивости энергосистемы при возникновении переходных процессов, при этом используются быстродействующие свойства устройств UPFC для реализации управляющих воздействий.

2.5 Повышение статической и динамической устойчивости

Сетевая инфраструктура, сформированная при ограниченных прогнозных возможностях, характеризуется ограниченной пропускной способностью и управляемостью. Рост электропотребления и интеграция новых источников генерации приводят к работе сетей вблизи предельных режимов, сопровождаясь увеличением потерь, отклонениями напряжения и снижением устойчивости. Применение устройств FACTS позволяет повысить управляемость, снизить потери и улучшить устойчивость, откладывая необходимость строительства новых линий электропередачи.

В работе [16] методы чувствительности и индексные методы применяются для оптимального размещения STATCOM с целью снижения потерь и повышения устойчивости напряжения.

В работе [17] предложен подход на основе смешанной целочисленной динамической оптимизации (MIDO) для обеспечения допустимых показателей переходной устойчивости и кратковременной устойчивости напряжения при тяжёлых возмущениях; задача решается методом ветвей и границ с применением SVC. В [18] задача предотвращения коллапса напряжения формализована как задача метода смешанного целочисленного

нелинейного программирования и решается с использованием генетического алгоритма (GA) и методов последовательного линейного программирования.

2.6 Повышение устойчивости частоты

Рост электропотребления и развитие возобновляемой генерации, характеризующейся высокой стохастичностью и низкой инерционностью, приводят к ухудшению частотной устойчивости электроэнергетических систем. Недостаточное демпфирование колебаний может вызывать нарушение режимов и, в предельных случаях, системные аварии. В этих условиях регулирование частоты и мощности становится ключевым элементом управления.

Для повышения эффективности регулирования частоты применяются современные методы управления, включая оптимальные, адаптивные, робастные и интеллектуальные алгоритмы. В ряде работ показана эффективность применения устройств FACTS для демпфирования колебаний и повышения устойчивости частоты. Так, в [19] анализ субсинхронного резонанса выполняется с применением метода собственных значений и анализа демпфирующих моментов с учётом FACTS-устройств на базе преобразователей напряжения (VSC).

2.7 Оптимизация распределения реактивной мощности

Разнесённость генерации и нагрузки требует передачи значительных мощностей на большие расстояния, что сопровождается потерями и отклонениями напряжения, обусловленными реактивными параметрами сети. Это ухудшает профиль напряжения и снижает устойчивость, создавая риск нарушения режимных ограничений и аварий. Обеспечение допустимых уровней напряжения достигается за счёт управления реактивной мощностью и применения компенсирующих устройств. При этом задача их оптимального размещения и настройки носит многопараметрический характер и требует использования эффективных методов оптимизации.

В работе [20] предложена стратегия планирования реактивной мощности на основе оценки запаса устойчивости по напряжению относительно точки коллапса в установившемся режиме. Для верификации подхода используются устройства SVC, а задача оптимизации решается методом внутренней точки; при этом выбор типа FACTS-устройства не получил достаточного обоснования.

2.8 Снижение выбросов парниковых газов

Рост энергопотребления при сохранении высокой доли генерации на ископаемом топливе сопровождается увеличением выбросов парниковых газов (CO_2, CH_4, N_2O) и негативным воздействием на окружающую среду. Повышение энергоэффективности и снижение выбросов являются ключевыми

задачами энергетики. В этом контексте устройства FACTS рассматриваются как эффективный инструмент снижения потерь, оптимизации режимов и повышения пропускной способности электроэнергетических систем.

В работе [2] представлен обзор применения силовой электроники, включая устройства DSTATCOM, для снижения выбросов парниковых газов. Рассмотрены различные методы оптимизации, особенности управления, а также преимущества и ограничения применения данных технологий в задачах повышения энергоэффективности и экологической устойчивости электроэнергетических систем.

Результаты и обсуждение

Анализ представленных в предыдущем разделе публикаций показывает, что применение устройств FACTS в целом способствует улучшению показателей функционирования электроэнергетических систем. При этом эффективность решения конкретных задач в значительной степени определяется типом применяемого устройства FACTS и выбранным методом оптимизации. В таблице 1 приведены классификации методов оптимизации в соответствии с решаемыми целевыми задачами, а также указаны типы используемых устройств FACTS и достигаемые эффекты. В таблицах 2-4 представлены сравнительное описание методов оптимизации с точки зрения их характеристик и ограничений.

Сравнительный анализ показывает, что классические аналитические методы отличаются высокой вычислительной эффективностью, однако ограничены при учёте нелинейности и задачах большой размерности. Методы математического программирования обеспечивают хорошую сходимость, но испытывают трудности при большом числе ограничений. Современные метаэвристические алгоритмы наиболее универсальны для многокритериальных задач, позволяя получать множество альтернативных решений и эффективно учитывать ограничения. Вместе с тем они не гарантируют нахождение глобального оптимума и чувствительны к начальным условиям.

Как следует из таблиц 2–4, различные методы оптимизации обладают разной областью применимости: одни более эффективны для задач малой размерности, другие – для крупномасштабных систем; одни обеспечивают более высокую скорость сходимости, другие – более высокую точность; одни предпочтительны для многокритериальной оптимизации, тогда как другие эффективнее при решении одноцелевых задач. В связи с этим выбор метода оптимизации должен осуществляться с учётом специфики постановки задачи.

Для повышения эффективности решений всё более широко применяются гибридные подходы, объединяющие преимущества различных методов.

Следует отметить, что при выборе метода оптимизации важное значение имеет не только достижение минимального значения целевой функции, но и практическая реализуемость полученного решения. Поэтому наиболее обоснованным является применение таких методов, которые позволяют одновременно анализировать несколько критериев и формировать набор компромиссных решений. Кроме того, результаты оптимизации должны быть устойчивыми к изменению исходных данных

Анализ литературы показывает, что большинство исследований ограничено 1–3 типами устройств FACTS, а сравнительный анализ методов оптимизации носит фрагментарный характер. Для объективной оценки необходимы комплексные исследования с учётом точности, скорости сходимости и устойчивости к локальным минимумам, что определяет перспективные направления дальнейших работ.

Таблица 1 – Классификация методов оптимизации по целям

№	Цель	Ссылка	Метод	FACTS	Класс метода	Эффект
1	Снижение перегрузок в сети	[3]	EV	SVC, TCSC	КАМ	1,2
		[4]	SM	TCSC, UPFC	КАМ	3,4
		[5]	NLP	TCSC	КАМП	3,2
		[1]	PSO	TCSC, SVC	СМА	4
2	Оптимизация затрат	[6]	SM	Продольные FACTS	КАМ	5
		[7]	NLP	TCSC, SVC	КАМП	6
		[8]	GA PSO	UPFC	СМА	7
		[9]	BBO PSO	TCSC, SVC UPFC	СМА	8,9
3	Снижение потерь мощности	[10]	MA	TCPS	КАМ	2,10
		[11]	GWO	UPFC, SVC	СМА	8,3
		[12]	MPA GSA TLBO	TCSC, TCPS GSA, TLBO	СМА	11
4	Оптимизация распределения реактивной мощности	[20]	IPM	SVC	КАМ	2,10

5	Повышение надежности и безопасности энергосистемы	[13]	SM	TCSC	КАМ	1
		[15]	NLP	UPFC	КАМП	12
		[14]	GSA	TCSC, SVC, UPFC	СМА	13,14
6	Повышение устойчивости частоты	[19]	EV	IPFC, GUPFC,SSC	КАМ	2
7	Повышение статической и динамической устойчивости	[16]	SM IM	STATCOM	КАМ	4,9
		[17]	BB	SVC	КАМП	15
		[18]	GA	SVC	СМА	16
8	Оптимизация распределения реактивной мощности	[2]	GA PSO	DSTATCOM	КАМ	4,10,3

Примечания к Таблице 1:
КАМ – Классические аналитические методы; КАМП – Классические методы математического программирования; СМА – Современные метаэвристические алгоритмы; 1 – повышение нагрузочной способности; 2 – повышение динамической устойчивости; 3 – минимизация затрат; 4 – снижение потерь мощности; 5 – улучшение диспетчеризации генерации; 6 – снижение отключений нагрузки; 7 – управление перегрузками; 8 – снижение отклонений напряжения; 9 – повышение безопасности системы; 10 – снижение гармоник; 11 – снижение затрат на генерацию; 12 – улучшение профиля напряжения; 13 – повышение устойчивости по напряжению; 14 – оптимальный режим; 15 – управление реактивной мощностью; 16 – превентивное управление аварийными режимами.

Таблица 2 – Сравнительный анализ существующих классических аналитических методов оптимизации

Метод оптимизации	**Преимущества**	**Ограничения**
Метод модального анализа	Способность прогнозировать ключевые характеристики альтернативных решений	Снижение точности из-за учета ограничений; ограниченная прогностическая способность
Индексный метод	Быстрый доступ к требуемым параметрам; достаточная эффективность	Низкая гибкость; трудности прогнозирования и расчета неиндексируемых параметров
Управляемый метод	Простой принцип работы; легкость реализации	Снижение точности

Метод собственных значений	Возможность разбиения сложной задачи на простые	Необходимость большого объема вычислений
Метод чувствительности	Высокая надежность; способность прогнозировать результаты	Зависимость от предыдущих решений

Таблица 3 – Сравнительный анализ существующих классических алгоритмов математического программирования

Метод оптимизации	**Преимущества**	**Ограничения**
Метод Ньютона	Быстрая сходимость; простота реализации	Требуется модификация для крупных задач
Метод внутренней точки	Эффективен для задач с ограничениями	Риск попадания в локальный оптимум
Метод ветвей и границ	Снижение количества узлов; низкая сложность	Сложность применения для больших сетей
Нелинейное программирование	Высокая эффективность; применимость к нелинейным задачам	Риск локального оптимума
MINLP	Работа с непрерывными и дискретными переменными	Нет гарантии глобального оптимума
ACL	Повышенная гибкость и устойчивость	Возможные нестабильности; сложность реализации
Динамическое программирование	Использование подзадач; поиск глобального решения	Отсутствие универсального алгоритма; высокая трудоемкость

Таблица 4 – Сравнительный анализ существующих современных метаэвристических алгоритмов

Метод оптимизации	**Преимущества**	**Ограничения**
Имитация отжига (SA)	Решение нелинейных задач; поиск глобального решения	Длительные вычисления; нет гарантии точности
Поиск с запретами (TS)	Интенсификация и диверсификация поиска	Требует большого числа итераций; много параметров
VNS	Повышение качества решений	Чрезмерная разведка; медленная сходимость

GLS	Выход из локальных минимумов	Нет критерия остановки
GSA	Хороший глобальный поиск	Слабый локальный поиск
Генетический алгоритм (GA)	Простота реализации; избегание локальных минимумов	Медленная сходимость; нет гарантии глобального оптимума
DE	Мало параметров; постепенное улучшение	Зависимость от параметров
CSA	Разнообразие решений; высокая адаптивность	Риск преждевременной сходимости
Меметический алгоритм	Предотвращение преждевременной сходимости	Низкое разнообразие решений
BSA	Исключение плохих решений	Неприменим без частичных решений
SOS	Не требует настройки параметров; быстрая сходимость	Сложность балансировки поиска
SOA	Хорошие глобальные поисковые способности	Риск локального оптимума
ACO	Адаптивность;	Медленная сходимость
PSO	Простота реализации; высокая скорость сходимости	Риск локального оптимума
ABC	Гибкость и устойчивость	Проблемы точности; преждевременная сходимость
CSO	Баланс разведки и функций	Риск локального оптимума
CRO	Адаптивная популяция; параллельные вычисления	Медленная сходимость
WCA	Подходит для крупных задач	Преждевременная сходимость
EPC	Решение нелинейных задач	Замедление сходимости
GWO	Альтернативные решения	Медленная сходимость
GSO	Разбиение на подзадачи	Снижение точности
IWD	Быстрая сходимость	Сложность остановки

JOA	Подходит для крупных задач	Низкая гибкость
ALO	Баланс поиска	Преждевременная сходимость

Выводы

Согласно прогнозам ведущих международных организаций, таких как Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) и International Energy Agency (IEA), ожидается дальнейший рост спроса на электроэнергию. Непрерывное развитие науки и технологий обусловливает внедрение новых типов оборудования и нагрузок, что приводит к усложнению структуры электроэнергетических систем и увеличению их размерности. В этих условиях применение устройств FACTS и оптимизация режимов работы энергосистем становятся необходимыми для обеспечения надёжности и эффективности функционирования.

Среди современных решений особое внимание уделяется многофункциональным устройствам, таким как UPFC и GUPFC, обладающим возможностью комплексного регулирования параметров режима (напряжения, потоков мощности, реактивной мощности). Вместе с тем существенным ограничивающим фактором их широкого внедрения остаётся высокая стоимость. Как показано в [11], несмотря на более высокую эффективность UPFC в снижении загрузки линий и отклонений напряжения, его применение сдерживается значительными капитальными затратами, превышающими суммарную стоимость альтернативных решений на базе TCSC и SVC. В связи с этим перспективным направлением исследований является разработка методов оптимизации стоимости внедрения устройств FACTS с учётом их технико-экономической эффективности.

Анализ современных тенденций показывает активное развитие многокритериальных методов оптимизации, включая Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA), Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) и NSGA. Следует отметить, что эффективность метаэвристических алгоритмов существенно зависит от характера решаемой задачи, что требует проведения сравнительного анализа различных подходов для выбора наиболее подходящего метода. В этой связи особый интерес представляют гибридные методы, сочетающие классические подходы с алгоритмами многокритериальной оптимизации на основе недоминируемой сортировки, которые демонстрируют высокую эффективность при решении сложных задач с множеством ограничений и целей.

Стремительный рост электропотребления, необходимость повышения экономической эффективности и значительные капитальные затраты на развитие сетевой инфраструктуры приводят к обострению таких проблем, как перегрузка линий электропередачи, снижение энергоэффективности, ухудшение устойчивости (в том числе напряжения и переходной устойчивости), а также снижение качества и надёжности электроснабжения. Устройства FACTS доказали свою эффективность в повышении показателей функционирования электроэнергетических систем по различным направлениям.

В рамках настоящей работы выполнен обзор современных методов оптимизации, применяемых для решения задачи оптимального размещения устройств FACTS. Проведена их классификация в зависимости от целевых функций оптимизации. Кроме того, выполнен сравнительный анализ методов с выделением их преимуществ и ограничений, что позволяет обосновать выбор подходов для решения конкретных задач оптимизации в электроэнергетических системах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **John, A.J., Joseph, T., Sreedharan, S.** Allocation of FACTS Devices For Congestion Relief Using Particle Swarm Optimization // International Journal of Engineering Research and Technology. – 2013. – Vol. 2. – P. 2395–2401.

2 **Hannan, M.A., Hossain Lipu, M.S., Ker, P.J., Begum, R.A., Agelidis, V.G., Blaabjerg, F.** Power electronics contribution to renewable energy conversion addressing emission reduction: Applications, issues, and recommendations // Applied Energy. – 2019. – Vol. 251. – P. 1–25.

3 **Pilotto, L.A.S., Ping, W.W., Carvalho, A.R., Wey, A., Long, W.F., Alvarado, F.L., Edris, A.** Determination of needed FACTS controllers that increase asset utilization of power systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1997. – Vol. 12. – P. 364–371.

4 **Orfanogianni, T., Bacher, R.** Steady-state optimization in power systems with series FACTS devices // IEEE Transactions on Power Systems. – 2003. – Vol. 18. – P. 19–26.

5 **Esmaili, M., Shayanfar, H.A., Moslemi, R.** Locating series FACTS devices for multi-objective congestion management improving voltage and transient stability // European Journal of Operational Research. – 2014. – Vol. 236. – P. 763–773.

6 **Sahraei-Ardakani, M., Blumsack, S. A.** Transfer Capability Improvement Through Market-Based Operation of Series FACTS Devices // IEEE Transactions on Power Systems. – 2016. – Vol. 31. – P. 3702–3714.

7 **Ghaemi, S., Aghdam, H., Safari, A., Farrokhifar, M.** Stochastic economic analysis of FACTS devices on contingent transmission networks using hybrid biogeography-based optimization // Springer Nature. – 2019. – Vol. 101. – P. 829–843.

8 **Taher, S. A., Amooshahi, M. K.** New approach for optimal UPFC placement using hybrid immune algorithm in electric power systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – Vol. 43. – P. 899–909.

9 **Kavitha, K., Neela, R.** Optimal allocation of multi-type FACTS devices and its effect in enhancing system security using BBO, WIPSO & PSO. // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2018. – Vol. 5. – P. 777–793.

10 **Xing, K., Kusic, G.** Application of thyristor-controlled phase shifters to minimize real power losses and augment stability of power systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1988. – Vol. 3. – P. 792–798.

11 **Shehata, A. A., Korovkin, N. V., Tolba, M. A., Tulsky, V. N.** Efficient Utilization of the Power Grid using FACTS devices based on a new Metaheuristic Optimizer // Proceedings of the 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – Moscow, Russia, 11–13 March 2021. – P. 1–7.

12 **Sulaiman, M. H., Mustaffa, Z.** Optimal placement and sizing of FACTS devices for optimal power flow using metaheuristic optimizers // Results in Control and Optimization. – 2022. – Vol. 8. – Art. 100145.

13 **Verma, M. K., Srivastava, S. C.** Optimal Placement of TCSC for Static and Dynamic Voltage Security Enhancement. – Madras : Indian Institute of Technology, 2004. – P. 713–718..

14 **Padmavathi, V. S., Sahu, S. K., Jayalaxmi, A.** Application of gravitational search algorithm to improve power system security by optimal placement of FACTS devices // Journal of Electrical Systems. – 2015. – Vol. 11. – P. 326–342.

15 **Bruno, S., De Tuglie, E., La Scala, M., Scarpellini, P.** Dynamic security corrective control by UPFCs // IEEE Transactions on Power Systems. – 2001. – Vol. 16. – P. 490–497.

16 **Ismail, B., Wahab, N. I. A., Ahmad, W., Othman, M. L., Radzi, M. A. M., Vijayakumar, K. N., Naain, M. M.** Analytical approaches on optimal placement of STATCOM under contingency occasions // Proceedings of the 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). – Bangkok, Thailand, 15–18 September 2020. – P. 7–12.

17 **Tiwari, A., Ajjarapu, V.** Optimal Allocation of Dynamic VAR Support Using Mixed Integer Dynamic Optimization // IEEE Transactions on Power Systems. – 2011. – Vol. 26. – P. 305–314.

18 **El-Araby, E. E., Yorino, N., Sasaki, H.** A Comprehensive Approach for FACTS Devices Optimal Allocation to Mitigate Voltage Collapse. 2002.

19 **Venkateswarlu, S., Janaki, M., Thirumalaivasan, R., Prabhu, N.** A review on damping of torsional interactions using VSC based FACTS and subsynchronous damping controller // Annual Reviews in Control. – 2018. – Vol. 46. – P. 251–264.

20 **Parker, C. J., Morrison, I. F., Sutanto, D.** Application of an optimisation method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning // IEEE Transactions on Power Systems. – 1996. – Vol. 11. – P. 1473–1481.

Поступило в редакцию 29.04.26.
Поступило с исправлениями 05.05.26.
Принято в печать 31.08.26.

**Т. М. Абылкаиров[1], А. Т. Бектимиров[2]*
[1,2]Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы
энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[2]R&D Power Grid Automation,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
29.04.26 ж. баспаға түсті.
05.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

FACTS ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР РЕЖИМДЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ ӘДІСТЕРІНЕ ШОЛУ

Соңғы онжылдықтарда электр энергиясына сұраныстың қарқынды өсуі электр желілерінің өткізу қабілетінің шекті мәндеріне жақын режимдерде жұмыс істеуіне алып келді. Бұл өз кезегінде қуат шығындарының артуымен, тұрақтылық қорларының төмендеуімен, сондай-ақ электрмен жабдықтаудың сапасы мен сенімділігінің нашарлауымен қатар жүреді. FACTS құрылғылары электр энергетикалық жүйелердің басқарылуын және пайдалану

тиімділігін арттырудың ең тиімді құралдарының бірі ретінде қарастырылады.

FACTS құрылғыларын қолдануға арналған зерттеулер көлемінің айтарлықтай болуына қарамастан, қолданыстағы әдебиеттер фрагменттелген сипатқа ие: әртүрлі жұмыстарда салыстыруға келмейтін мақсаттық функциялар, әркелкі есеп қойылымдары және тиімділікті бағалаудың әртүрлі критерийлері қолданылады. Бұл нәтижелерді жүйелі салыстыруды және бірізді қорытындылар қалыптастыруды қиындатады. Сонымен қатар, оңтайландыру есептерін олардың электр энергетикалық жүйелердің жұмыс режимдеріне әсері тұрғысынан жіктеудің бірыңғай тәсілі жоқ.

Осы мақалада FACTS құрылғыларын қолдану арқылы электр энергетикалық жүйелердің тиімділігін арттыру әдістеріне жүйелендірілген және сыни шолу ұсынылады. Қолданыстағы зерттеулерден айырмашылығы, оңтайландырудың мақсаттық функцияларына негізделген тәсілдердің құрылымдалған жіктемесіне ерекше назар аударылады. Әртүрлі оңтайландыру әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктерін, сондай-ақ олардың әртүрлі өлшемдегі және күрделіліктегі есептерге қолданылуын анықтауға бағытталған терең салыстырмалы талдау жүргізілді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы FACTS құрылғыларын орналастыру есептері үшін мақсаттық функцияларды жіктеудің бірыңғай құрылымын қалыптастыруда, қолданыстағы тәсілдердің негізгі әдіснамалық шектеулерін анықтауда және болашақ зерттеулердің перспективалы бағыттарын айқындауда көрініс табады.

Кілтті сөздер: FACTS құрылғылары, оңтайландыру әдістері, оңтайландырудың мақсаттық функциялары, метаэвристикалық алгоритмдер, электр энергетикалық жүйелер.

**T. M. Abylkairov[1], A. T. Bektimirov[2]*
[1,2] Gumarbek Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2]R&D Power Grid Automation,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 29.04.26.
Received in revised form 05.05.26.
Accepted for publication 31.08.26.

REVIEW OF OPTIMIZATION METHODS FOR POWER SYSTEM OPERATION USING FACTS DEVICES

In recent decades, the rapid growth in electricity demand has led to the operation of power networks under conditions close to their maximum transmission capacity limits. This is accompanied by increased power losses, reduced stability margins, and deterioration in the quality and reliability of power supply. FACTS devices are considered one of the most effective tools for improving controllability and operational efficiency of power systems.

Despite the significant volume of research devoted to the application of FACTS devices, the existing literature remains fragmented: different studies employ incomparable objective functions, heterogeneous problem formulations, and varying performance evaluation criteria. This makes it difficult to systematically compare results and develop unified conclusions. In addition, there is no unified approach to the classification of optimization problems in terms of their impact on power system operating conditions.

This paper presents a systematic and critical review of methods for improving the performance of power systems using FACTS devices. In contrast to existing studies, particular attention is paid to a structured classification of approaches based on optimization objective functions. A comprehensive comparative analysis is conducted to identify the strengths and limitations of various optimization methods, as well as their applicability to problems of different scales and complexity.

The scientific contribution of this work lies in the development of a unified framework for classifying optimization objective functions in FACTS placement problems, the identification of key methodological limitations in existing approaches, and the determination of promising directions for future research.

Keywords: FACTS devices, optimization methods, objective functions, metaheuristic algorithms, power systems.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
19,0 Mb RAM
Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.
Электронное издание
19,0 Mb RAM
Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69
E-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik-energy.tou.edu.kz