



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

*На правах рукописи*

**Шехата Ахмед Абдельхамид Ахмед Хамед**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ  
ЭНЕРГОСИСТЕМ С АДАПТИВНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ**

05.09.05 – Теоретическая электротехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: **Коровкин Николай Владимирович**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Никитин Виктор Валерьевич**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Электротехника и теплоэнергетика" Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I" (ФГБОУ ВО ПГУПС), г. Санкт-Петербург.

**Грицутенко Станислав Семенович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационная безопасность», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно производственное объединение «Стример», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 26 мая 2022 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета У.05.09.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главный учебный корпус, ауд. 176.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» апреля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета У.05.09.05,  
к.т.н., доцент



Миневич Татьяна Геннадьевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность и степень проработанности темы исследования.** Повышение глобального спроса на электроэнергию в связи с социально-экономическим развитием и ограничениями на расширение строительства электростанций и линий электропередач привело к значительному разрыву между производством электроэнергии и потреблением. Следовательно, это привело к ненадлежащей работе энергосистем, такой как чрезмерные потери электроэнергии, перегруженность линий, нестабильный уровень напряжения, проблемы надежности и устойчивости. Работа энергосистемы может быть улучшена за счет применения передовых технологий, основанных на достижениях современной силовой электроники. Гибкие системы передачи переменного тока (FACTS - flexible alternating current transmission system) обеспечивают эффективное использование оборудования энергосистем со значительно меньшими инвестициями, чем дополнительные затраты на строительство новых линий и генерирующих станций. Для выбора необходимой мощности и расположения устройств FACTS было применено несколько методов включающих как аналитические, так и метаэвристические методы оптимизации. Аналитические подходы используют аппроксимацию характеристик режимов для решения проблем размещения устройств FACTS, чтобы уменьшить время вычислений. Во многих случаях эти подходы теряют точность вычислений и способность решать задачи нахождения оптимального месторасположения и мощности. Метаэвристические методы оптимизации, с другой стороны, имеют ряд недостатков, включая дисбаланс между фазами эксплуатации и исследования, преждевременную сходимость, раннюю потерю разнообразия и попадание в локальные экстремумы. В результате место и мощность устройств FACTS в могут быть определены неверно и ожидаемое улучшение характеристик энергосистемы будет достигнуто. Весовые коэффициенты для распределения предпочтений лиц, принимающих решения, являются еще одним вопросом для многоцелевого оптимального распределения устройств FACTS. Лица, принимающие решения, присваивают веса критериям на основе их уровней важности, но они не проверяют их согласованность, что снижает надежность результатов. Разработка новых эффективных алгоритмов для улучшения характеристик энергосистемы с помощью устройств FACTS является актуальной темой современной теоретической электротехники и соответствует разделу паспорта специальности 05.09.05 - Теоретическая электротехника: - "разрабатываются ... прикладные аспекты интеграции информационной техники и объектов электротехники, электроэнергетики ...». Близкой тематикой в России занимались Алехин Р. А., Кулаев И. С., Смоловика С.В., Кубарьков Ю. П., Балабанов М. С., Шакарян Ю. Г., Воропай Н.И., Бутырин П.А., Гусев С. И., Колобов В. В., Виноградов А. А., Пальчатая А. А., Люкевич В. В., Chudny V.S., Новиков Н. Л., Кузьмич С. В., Хамитов Р. Н., Поспелов Г. Е., Баранник М. Б., Belyaev N. A., а также зарубежные ученые: Lee D. S., Dash S. P., Subhashini K. R., Lee H. J., Yoon Y. D., Satapathy J.K., Chow J. H., Sanchez-Gasca J. J., Daealhaq H. M., Kfajey Y. F., Tukkee A. S., Mokhtari M. S., Sureshkumar L. V., Mehanna M. A., Kanaan H. M., Sharma P. R. и другие

**Цель данной работы.** разработка новых надежных методов многокритериальной оптимизации режимов работы энергосистем и расположения в них устройств FACTS при учете различных технических и экономических аспектов работы энергосистемы, обеспечивающих минимальные вычислительные затраты.

**Для достижения цели работы решаются следующие задачи:**

1. Исследование режимов энергосистемы при отсутствии устройств FACTS, а также определение параметров, влияющих на работу системы.

2. Критическая оценка существующих методов оптимизации расположения и мощности устройств FACTS в энергосистемах, выделение недостатков существующих методов.
3. Анализ математических подходов к многокритериальной оптимизации.
4. Сравнительное исследование различных типов устройств FACTS с учетом множества факторов, таких как конфигурация, эксплуатация и влияние на режимы работы энергосистемы.
5. Минимизация эксплуатационных расходов энергосистемы от установки устройств FACTS
6. Разработка всесторонней и полной формулировки проблемы оптимизации работы энергосистемы с использованием устройств FACTS.
7. Оптимизация работы энергосистемы путем использования различных оптимизационных формул и типов контроллеров FACTS.
8. Анализ результатов применения разработанных алгоритмов и сравнение их с другими методами из современной литературы.

**Научная новизна и теоретическая значимость работы** заключаются в:

1. Разработке нового, упрощенного, быстрого метода для повышения точности аналитических соотношений, используемых для оптимального размещения устройств FACTS в энергосистеме. Этот метод позволяет преодолеть проблемы, связанные с плохо обусловленными системами, используя линейную корреляцию между ее параметрами для повышения точности результатов и экономии времени расчета.
2. Повышении эффективности работы энергосистемы путем размещения различных типов устройств FACTS с помощью нового гибридного метода, основанного на автономных группах роя частиц (AGPSO - Autonomous Groups Particle Swarm Optimization) и алгоритме серых волков (GWO - Gray Wolf Optimizer). Новый метод улучшает возможности поиска, позволяет избежать ловушек локально оптимальных решений и сокращает время поиска.
3. Интегрировании метода предпочтения порядка по сходству с идеальным решением, так называемая «Техника упорядочивания предпочтений по сходству с идеальным решением» (TOPSIS- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), как метода принятия многокритериального решения (MCDM- multiple criteria decision making) с разработанными алгоритмами для определения наилучшего компромиссного решения из фронта Парето для многокритериальных задач размещения FACTS.
4. Применении метода аналитической обработки иерархии (АНР- Analytic Hierarchy Process) для оптимального выбора весов взвешенной суммы оптимизационных задач для соответствующего размещения FACTS в энергосистеме, который ранее не использовался для решения данной задачи.
5. Внедрение новых высокопроизводительных алгоритмов оптимизации: автономного группового PSO (AGPSO) и улучшенного GWO (IGWO), которые впервые используются для решения задач размещения FACTS. В работе подтверждено превосходство этих алгоритмов над ранее использовавшимися.

**Практическое значение работы** состоит в том, что ее результаты могут быть использованы для повышения производительности реальных электрических сетей. Новые алгоритмы оптимизации, разработанные в данной работе, могут быть использованы службами развития энергосистем и проектными организациями для решения задачи оптимального определения мощности и местоположения устройств компенсации реактивной мощности в электрических сетях. По сравнению с другими методами, разработанные методы сокращают время расчета на 60% при сохранении высокой точности результатов. Программы, разработанные в среде MATLAB, могут быть использованы в практических, научных и

образовательных целях, связанных с оптимальным определением мощности и местоположения дополнительных устройств, подключенных к электрическим сетям.

**Методология и методы исследования.** Основные методы исследования, используемые в работе: методы теоретической электротехники, математическое и компьютерное моделирование, статистический анализ, аналитические и метаэвристические алгоритмы, такие как оптимизация серого волка, оптимизация роя частиц (PSO), многовершинная оптимизация (MVO). Пакет MATLAB/SIMULINK (версия R2018b) и Excel (версия 2016) для решения задач. Пакет MATPOWER был использован для выполнения расчетов статических режимов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1- Новый метаэвристический гибридный алгоритм на основе методов APSO и GWO для оптимального определения размещения и размера устройства FACTS для улучшения характеристик энергосистемы.

2- Новый подход к оптимизации режимов работы ЭЭС, основанный на зависимости параметров режима ЭЭС от параметров FACTS-устройства.

3- Реализация метода TOPSIS для определения наилучшего компромиссного решения многокритериальной оптимизации установки FACTS устройств.

4- Определение оптимальных значений весовых коэффициентов для многоцелевых задач распределения FACTS с использованием метода АНР.

5- Результаты установки устройств FACTS в различных тестируемых системах IEEE на основе новых предложенных методов оптимизации.

**Степень надежности результатов.** Представленные в диссертации методы и алгоритмы разработаны и протестированы с использованием пакетов MATLAB и MATPOWER, проверенных за многие годы успешного использования. Сравнение с другими методами, представленными в литературе, выявило эффективность новых методов, что позволило оценить работоспособность представленных методов и методик.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертации доложены и обсуждены на: Международная научная конференция по электроэнергетике (ISEPC-2019), (Санкт-Петербург, Май 23 - 24, 2019), 2-я Международная молодежная конференция по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике (REEPE), (Москва, март 12-14, 2020) , Международная конференция по промышленной инженерии и современным технологиям (FarEastCon), (Владивосток, остров Русский, октябрь 6-9, 2020), 3-й Международная молодежная конференция по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике (REEPE), (Москва, март 11-13, 2021), Международная научная конференция по электроэнергетике (ISEPC-2021), (Санкт-Петербург, май 17-19, 2021).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в одиннадцать печатных работах в журналах и конференциях, включенных в международные системы цитирования (Scopus, Web of Science).

**Структура и объем работы.** Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение. Она изложена на 168 страницах и включает 40 таблиц и 77 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, показаны цель и задачи исследования, освещены научная новизна, методология и методы исследования, практическая значимость результатов исследования, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен всеобъемлющий обзор устройств FACTS, охватывающий широкий спектр тем: определения, типы, преимущества и недостатки, а также области применения. Также обсуждается влияние контроллеров FACTS на производительность электроэнергетических систем. Кроме того, демонстрируются параметры ключевой роли FACTS, которые могут быть использованы для управления активной и реактивной мощностью в электрических сетях для улучшения производительности и достижения наилучших критериев работы. Экономические вопросы устройств FACTS продемонстрированы в этой главе, включая уравнения стоимости установки и кривые стоимости для различных номиналов и типов контроллеров FACTS. Также представлен обзор литературы по оптимальному размещению устройств FACTS исходя из различных целевых функций и с использованием различных методов оптимизации.

**Вторая глава** посвящена обзору литературы по методам оптимизации для определения оптимального расположения, классификации и типа устройств FACTS в энергосистемах. В этой главе описываются четыре основных типа методов: (1) аналитические методы, (2) традиционные методы, (3) метаэвристические методы и (4) гибридные методы. Обсуждаются преимущества и недостатки каждого метода. В ходе данного исследования были выявлены слабые стороны каждого метода, в результате чего были предложены новые методы или модификации для достижения наиболее эффективной работы рассматриваемого метода. Аналитические методы используют аппроксимацию для решения задач оптимизации расположения FACTS с целью сокращения вычислительной процедуры. В результате эти методы страдают от недостаточной точности расчетов, а также от невозможности определить оптимальное местоположение и размер одновременно. Метаэвристические методы оптимизации, с другой стороны, имеют ряд недостатков, включая дисбаланс между фазами эксплуатации и исследования, преждевременную сходимость, раннюю потерю разнообразия и попадание в локальные экстремумы. В результате место и мощность устройств FACTS в могут быть определены неверно и ожидаемое улучшение характеристик энергосистемы будет достигнуто. Во втором разделе этой главы представлены различные методы, используемые для определения соответствующей мощности и местоположения устройств FACTS в энергосистемах. Исследуются преимущества и недостатки каждого метода, а также широко используемая методика оптимизации, основанная на каждом типе.

**В третьей главе** подробно описаны разработанные и предложенные в диссертации методы, которые заключаются в следующем:

Первый метод - аналитический подход обеспечивает оптимальное размещение устройств FACTS с низкой вычислительной нагрузкой, что приводит к меньшему времени расчета проблемы оптимизации и высокой точности результатов. Подход основан на использовании дробно-полиномиальных связей между параметрами режима ЭЭС и параметрами ее схемы замещения. Эти связи в общем случае имеют вид:

$$\xi(\mathbf{X}) = \frac{V(\mathbf{A}, \mathbf{X})}{W(\mathbf{B}, \mathbf{X})} \quad (1)$$

В (1) вектор  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}^T$  – вектор варьируемых параметров, в который, как уже отмечалось, входят эквивалентные сопротивления устройств FACTS и нагрузок. Вектора

$\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}^T$  и  $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_{M-1}\}^T$  состоят из комплексных констант, которые определяются из расчета текущего установившегося режима работы ЭЭС и ряда близких ему режимов.  $V$  и  $W$  – линейные полиномы от  $N$  переменных  $x_k$   $k = \overline{1, N}$ .

Для простейших случаев  $N=1$ , а также когда параметром режима является, например, напряжение  $\dot{U}$ , соотношения (1) имеют вид:

$$N = 1: \dot{U} = \frac{a_1 + a_2 x_1}{1 + b_1 x_1} \quad (2)$$

Для определения констант трижды рассчитаем установившийся режим ЭЭС при различных значениях  $x$ :  $x = x_1$ ,  $x = x_2$ ,  $x = x_3$ , то есть для нашей задачи найдем три тока  $\dot{U}_1 = \dot{U}|_{x=x_1}$ ,  $\dot{U}_2 = \dot{U}|_{x=x_2}$ ,  $\dot{U}_3 = \dot{U}|_{x=x_3}$ . Тогда константы могут быть определены из системы уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & -x_1 \dot{U}_1 \\ 1 & x_2 & -x_2 \dot{U}_2 \\ 1 & x_3 & -x_3 \dot{U}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Для исследования точности определения констант  $a_1, a_2, b$ , предположим, что напряжение  $k$ -го узла определяется (измеряется) с определенной погрешностью, которая моделируется следующим образом:

$$\forall_k, \bar{U}_k = \dot{U}_k (1 + \varepsilon \delta) \quad (4)$$

где  $\dot{U}_k$ ,  $\bar{U}_k$  - соответственно точное значение напряжения и его измеряемая величина,  $\delta$  - случайная величина равномерно распределенная на интервале  $[-1; 1]$ , имитирующая ошибки измерения,  $\varepsilon$  - амплитуда ошибки. Далее величины напряжений  $\bar{U}_k$  использовались для определения констант  $a_1, a_2, b$ . После того, как константы  $a_1, a_2, b$  определены, мы имеем функциональную зависимость вида  $\bar{\bar{U}}_k(x) = \frac{a_{1,k} + a_{2,k}x}{1 + bx}$  для всех напряжений. Соответственно, для каждого напряжения может быть вычислена относительная среднеквадратичная погрешность  $E_k$ , с которой эта зависимость аппроксимирует точную зависимость  $\dot{U}_k(x)$ , полученную путем многократного расчета установившихся режимов:

$$E_k(\varepsilon, \delta) = \sqrt{\frac{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \left( \bar{\bar{U}}_k(x) - \dot{U}_k(x) \right)^2 dx}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} |\dot{U}_k(x)|^2 dx}} \approx \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^{p=P} \left( \bar{\bar{U}}_k(x_p) - \dot{U}_k(x_p) \right)^2}{\sum_{p=1}^{p=P} |\dot{U}_k(x_p)|^2}} \quad (5)$$

где  $x_{\min}, x_{\max}$  - допустимые границы изменения  $x$ ,  $x_p$   $p = \overline{1, P}$  - набор значений  $x$ , в которых выполняется оценка погрешности. Погрешность  $E_k(\varepsilon, \delta)$ , вычисленная по (5), зависит от значения случайной величины  $\delta$ . Решение (2) при высокой погрешности измерения  $\varepsilon=10^{-2}$  (соответствует погрешности измерений 1%) погрешность  $E_k$  воспроизведения зависимостей параметров режима от параметров схемы замещения недопустимо высока. Это объясняется

плохой системой определения констант. В данной диссертации предлагается высокоточная система определения констант, основанная на линейной корреляции плохо обусловленной системы. Решение системы уравнений  $\mathbf{A}\mathbf{y}=\mathbf{B}$  с плохообусловленной матрицей  $\mathbf{A}$  не имеет смысла в силу неустойчивости решения. Однако имеет смысл определение линейных связей  $\mathbf{L}\mathbf{y}=\mathbf{F}$  между элементами вектора неизвестных, точность определения которых близка к  $\eta$ . Для нахождения линейных связей используется соотношение:

$$\underset{\mathbf{L}}{\mathbf{A}}^S \mathbf{y} = \underset{\mathbf{F}}{\mathbf{A}}^{S-1} \mathbf{B} \quad (6)$$

где величина  $S=5-8$ . В качестве линейной связи между элементами вектора  $\mathbf{y}$  может использоваться любая строка (6). Далее, используя линейную связь, один из элементов вектора  $\mathbf{y}$  выражается через другие и подставляется в исходную систему уравнений  $\mathbf{A}\mathbf{y}=\mathbf{B}$ . После выполнения подстановки исходная система уравнений переходит в систему уравнений  $\mathbf{A}_1\mathbf{y}_1=\mathbf{B}_1$ , меньшего на единицу порядка. В соответствии с принципом повторных измерений необходимо далее выполнить новые эксперименты по определению элементов  $\mathbf{A}_1$  и  $\mathbf{B}_1$ , и, решив систему уравнений  $\mathbf{A}_1\mathbf{y}_1=\mathbf{B}_1$ , найти вектор  $\mathbf{y}_1$ . Последняя задача даст более точное решение в сравнении с исходной.

**Второй метод - автономные группы в рое частиц (AGPSO).** Этот метод является модификацией классического PSO, который широко используется для распределения FACTS. Основными проблемами обычного алгоритма PSO являются медленная скорость сходимости и ловушка локальных экстремумов. Следовательно, при применении традиционного метода PSO для размещения устройств FACTS не удастся достичь глобального решения. В данной работе проблемы классического алгоритма PSO решаются посредством реализации техники AGPSO. Личностное и социальное поведение для всех частиц классического алгоритма PSO реагирует одинаково, что приводит к вышеупомянутым недостаткам классической методики PSO. Сходство поведения частиц, обусловленное когнитивным и социальным коэффициентами ( $c_1$  и  $c_2$ ), рассматривается как фиксированные значения. В отличие от традиционного метода PSO, подход AGPSO обеспечивает несколько автономных стратегий поведения частиц, которые приводят к лучшему освоению и исследованию пространства поиска. В методе AGPSO особи (частицы) делятся на четыре автономные группы, вдохновленные колонией термитов, каждая из которых имеет математическую модель для обновления значений констант  $c_1$  и  $c_2$ , как указано в таблице 1.

Таблица 1— Схема обновления  $c_1$  и  $c_2$

Группы	Обновить $c_1$	Обновить $c_2$
Группа 1	$-2l^{1/3}/L^{1/3} + 1.95$	$2l^{1/3}/L^{1/3} + 0.05$
Группа 2	$-2l^3/L^3 + 2.5$	$2l^3/L^3 + 0.5$
Группа 3	$-2l^{1/3}/L^{1/3} + 1.95$	$2l^3/L^3 + 0.5$
Группа 4	$-2l^3/L^3 + 2.5$	$2l^{1/3}/L^{1/3} + 0.05$

Как показано в таблице 1,  $c_1$  и  $c_2$  были обновлены с помощью нелинейной изменяющейся во времени стратегии, которая использовала множество функций с различной кривизной, точками пересечения и наклонами. Это обеспечивает более широкий диапазон действий частиц во время процедуры оптимизации. В результате достигается лучший баланс между использованием и



исследованием пространства поиска, что приводит к более точному определению оптимального расположения устройств FACTS.

**Третий метод - улучшенный алгоритм «серого волка» (алгоритм волчьей стаи) (IGWO- Improved Grey Wolfe Optimization).** При решении классическим алгоритмом GWO может возникать падение разнообразия решений, что приводит к ранней сходимости без достижения оптимального глобального решения. Поэтому был предложен алгоритм IGWO для преодоления недостатков классического алгоритма GWO. В методе IGWO новая позиция волков выбирается из двух предложенных местоположений. Первый основан на групповой охоте, как и классический метод GWO. Второй основан на новой стратегии, названной охота, основанная на изучении измерений ( DLH - Dimension Learning-Based Hunting), основанной на независимом охотничьем поведении волков. В стратегии DLH происходит обмен информацией между волками посредством построения окрестности для каждого волка, что способствует исследованию пространства поиска, сохранению разнообразия и исключению попадания в локальный экстремум. После вычисления новой позиции,  $X_{i-GWO}$ , по классическому алгоритму GWO, предлагаемая обновленная позиция по методологии DLH может быть определена с помощью (7).

$$X_{i-DLH}(t+1) = X_i(t) + rand \times (X_n(t) - X_r(t)) \quad (7)$$

где  $X_n(t)$  случайный сосед, выбранный из соседей волка в текущей итерации,  $X_r(t)$  это случайный сосед, выбранный из всей стаи волков. Наконец, вводится этап выбора для определения местоположения волков на следующей итерации следующим способом:

$$X_i(t+1) = \begin{cases} X_{i-GWO}(t+1), & \text{if } f(X_{i-GWO}) < f(X_{i-DLH}) \\ X_{i-DLH}(t+1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

**Четвертый метод - гибридный автономные группы рой частиц и алгоритм «серого волка» (AGPSO-GWO).** Какой новый надежный и хорошо зарекомендовавший себя гибридный подход к оптимизации, сочетающий алгоритм AGPSO с алгоритмом GWO. Новый гибридный метод AGPSO-GWO использует привилегию разнообразия поведения частиц, предоставляемую методом AGPSO, для улучшения производительности алгоритма GWO. Поисковые агенты разработанного алгоритма имеют разнообразное социальное и персональное поведение, что позволяет избежать ловушки локального оптимума и повысить скорость сходимости. Кроме того, были реализованы различные стратегии изменения времени на основе нелинейных изменяющихся во времени коэффициентов, чтобы сбалансировать фазы эксплуатации и разведки и избежать потери разнообразия. Предложенный алгоритм не полагается исключительно на три наилучших решения (альфа, бета и дельта), как это делает классический алгоритм GWO. Был добавлен еще один метод, в котором волки в стае делятся на четыре автономные группы. Механизм поиска каждой группы управляется изменяющимися во времени коэффициентами  $c_{g1}, c_{g2}, c_{g3}$ . В таблице 2 представлена стратегия обновления этих коэффициентов. Алгоритм AGPSO-GWO управляет исследованием и эксплуатацией серого волка в пространстве поиска, используя константу инерции, а не традиционные математические уравнения. Это показано в (9), где представлены обновленные позиции трех лучших агентов.

Таблица 2— Схема обновления  $c_{g1}, c_{g2}, c_{g3}$ 

Группы	Обновить $c_{g1}$	Обновить $c_{g2}$	Обновить $c_{g3}$
Группа 1	$-2t^{1/3}/T^{1/3} + 1.95$	$2t^{1/3}/T^{1/3} + 0.05$	$-2t^{1/3}/T^{1/3} + 2.5$
Группа 2	$-2t^3/T^3 + 2.5$	$2t^3/T^3 + 0.5$	$t/T + 1.25$
Группа 3	$-2t^{1/3}/T^{1/3} + 1.95$	$2t^3/T^3 + 0.5$	$-2t^3/T^3 + 2.5$
Группа 4	$-2t^3/T^3 + 2.5$	$2t^{1/3}/T^{1/3} + 0.05$	$t/T + 1.25$

$$\begin{aligned}
\overline{H}_\alpha &= \left| \overline{M}_1 \cdot \overline{X}_\alpha - \omega_i \cdot \overline{X}(t) \right|, \overline{H}_\beta = \left| \overline{M}_2 \cdot \overline{X}_\beta - \omega_i \cdot \overline{X}(t) \right|, \overline{H}_\delta = \left| \overline{M}_3 \cdot \overline{X}_\delta - \omega_i \cdot \overline{X}(t) \right|, \\
\overline{X}_1 &= \left| \overline{X}_\alpha - \overline{K}_1 \cdot \overline{H}_\alpha \right|, \overline{X}_2 = \left| \overline{X}_\beta - \overline{K}_2 \cdot \overline{H}_\beta \right|, \overline{X}_3 = \left| \overline{X}_\delta - \overline{K}_3 \cdot \overline{H}_\delta \right|, \\
M &= 2a_1, \omega_i = \omega^{\max} - (\omega^{\max} - \omega^{\min}/T) \cdot it, K = 2\overline{c} \cdot a_2 - \overline{c}, c = 2(1-t/T)
\end{aligned} \tag{9}$$

где  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$  - положение лучших волков, альфа, бета и дельта, соответственно,  $\omega_i$  - вес инерции текущей итерации,  $t$  - текущая итерация,  $a_1, a_2$  - случайные константы в интервале  $[0,1]$ ,  $T$  - максимальное количество итераций. Наконец, позиция каждого волка на следующей итерации управляется вектором скорости следующим образом:

$$\begin{aligned}
V_i(t+1) &= \omega_i \cdot (V_i(t) + c_{g1}r_1(X_\alpha - X_i(t)) + c_{g2}r_2(X_\beta - X_i(t)) + c_{g3}r_3(X_\delta - X_i(t))), \\
X_i(t+1) &= X_i(t) + V_i(t+1)
\end{aligned} \tag{10}$$

где  $r_1, r_2, r_3$  случайные константы в интервале  $[0,1]$ . В следующем разделе этой главы определяется наилучшее компромиссное решение из оптимальных решений, что является одной из самых сложных проблем, возникающих при решении задач оптимизации размещения FACTS с несколькими целевыми функциями. Для решения этого типа задач исследователи использовали метод взвешенной суммы, при котором целевые функции суммируются с различными весами, и эта сумма оптимизируется. Однако лица, принимающие решения, определяли веса на основе собственных уровней важности, но не обеспечивали согласованности. Как следствие, результаты ненадежны. Метод MCDM является широко используемым вспомогательным инструментом во многих областях науки и промышленности. Это точный инструмент, который идеально подходит для определения наилучшего компромиссного решения среди множества альтернатив. Ранее он также не использовался для решения задачи оптимального размещения FACTS. Целью данной диссертации было восполнить пробел в исследованиях путем внедрения методологии MCDM для выбора наилучшего компромиссного решения и присвоения оптимальных весов предпочтениям лица, принимающего решение. В данном исследовании для поиска наилучшего компромиссного решения был использован метод TOPSIS [1] с помощью метода АНР для определения оптимальных значений весовых коэффициентов [2].

**В четвертой главе** подробно обсуждаются результаты, полученные при реализации новых предложенных в данной диссертации методов оптимального размещения устройств FACTS для улучшения эффективности работы энергосистем. При применении предложенного бифракционного метода к тестовым схемам IEEE14 и IEEE30, напряжения в узлах получены с большой точностью. результат относительной погрешности значения напряжения в узлах без применения предложенной процедуры коррекции с уровнем введенной погрешности измерений, равным 0.01. Анализ полученных результатов, представленных на рис. 1, 2, дает

следующие результаты: погрешность воспроизведения зависимостей параметров режима от параметров схемы замещения недопустимо высока. Для погрешности измерений 1% относительной погрешности напряжения достигает 800 и 1000 процентов для систем IEEE14 и IEEE30 соответственно. с другой стороны, как показано на рис. 3, 4, при использовании предложенного метода рассчитанное значение напряжения является более точным. Процент относительной

погрешности напряжения снизился до менее 5%, по сравнению с 800% и 1000% для систем IEEE 14 и IEEE30, соответственно. После этого предложенный метод используется для определения оптимального местоположения и мощности устройств FACTS в энергосистеме. Предложенный метод используется для определения оптимального размещения и размера статического тиристорного компенсатора, SVC(static VAR compensator) для минимизации потерь активной мощности и отклонения напряжения одновременно. Реактивная нагрузка увеличена до 30 МВАр в узле 14 в схеме IEEE14 и до 26 МВАр в схеме IEEE30 для исследования влияния SVC на потери активной мощности и профили напряжения в условиях высокой нагрузки. Предлагаемый аналитический метод используется для расчета

значений целевой функции для каждой возможной настройки SVC(т.е. мощность и узел установки SVC). После этого метод MOGA применяется для получения фронта парето в рассматриваемой оптимизационной задаче. Наконец, нечеткий механизм (fuzzy mechanism) применяется для выбора оптимального компромиссного решения из полученного фронта Парето. Сравнительное исследование было выполнено с использованием пакета MATPOWER, в рамках которого была проведена проверка точности предложенной методики. Программное обеспечение MATPOWER применяется для определения значений целевых функций для каждого возможного решения и алгоритм MOGA с нечетким механизмом реализуется для выбора оптимального решения. Как показано в таблице 3, в случае схемы IEEE14, оптимальное распределение SVC на основе предложенного метода снижает потери мощности с 14.44 до 13.63 МВт. С другой стороны, из-за противоречивых целей отклонение напряжения изменилось с 0.03 до 0.04 о.е. Как показатель точности полученных результатов, предложенный метод достиг

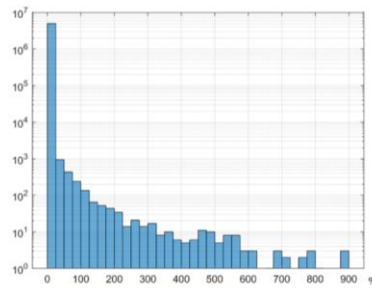


Рисунок 1 — Гистограммы погрешности для схемы IEEE14 при определении констант при уровне погрешности измерения 1% без предложенного метода

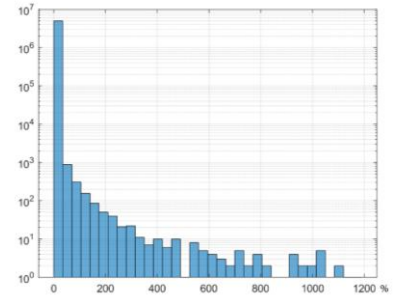


Рисунок 2 — Гистограммы погрешности для схемы IEEE30 при определении констант при уровне погрешности измерения 1% без предложенного метода

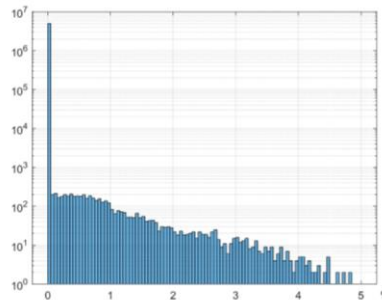


Рисунок 3 — Гистограммы погрешности для для схемы IEEE14 при определении констант при уровне погрешности измерения 1% при применении предложенного метода

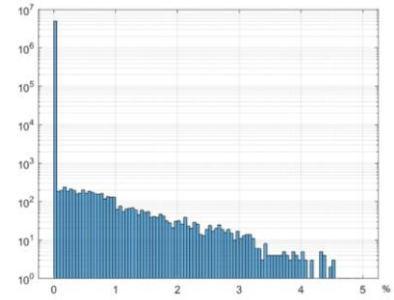


Рисунок 4 — Гистограммы погрешности для для схемы IEEE30 при определении констант при уровне погрешности измерения 1% при применении предложенного метода

почти тех же результатов, что и подход на основе MATPOWER, с относительными погрешностями 0,027 % и 0.284 % для  $P_L$  и  $V_D$ , соответственно. В таблице 3 также показано, что время расчета, необходимое для решения задачи предложенным методом, на 63.3% меньше, чем время, необходимое для решения задачи методом на основе MATPOWER. Это говорит о том, что предлагаемый метод экономит время, позволяя оператору управлять системой за меньшее время. Таблица 3 также показывает, что в случае схемы IEEE 30, предложенный метод снизил  $P_L$  и  $V_D$  с 26.52 МВт и 0.16 о.е. до 17.57МВт и 0.0351 о.е., соответственно. По сравнению с подходом на основе MATPOWER, предложенный метод дал высокоточные результаты с точностью 0.01 %. 0.25 % для  $P_L$  и  $V_D$ , соответственно. По сравнению с подходом на основе MATPOWER, предложенный метод потребовал на 54.05 % меньше времени для достижения тех же результатов.

Таблица 3 — Оптимальное решение, полученное с помощью испытанных методов для системы IEEE14 и 30.

Методы		Без SVC	с SVC	
		-	Предлагаемый метод	Метод на основе MATPOWER
$P_L$ (МВт)	Система IEEE 14	14.4373	13.6285	13.6248
	Система IEEE 30	26.5184	17.5654	17.5664
$V_D$ (о.е.)	Система IEEE 14	0.0313	0.0351	0.0352
	Система IEEE 30	0.1562	0.0398	0.0397
SVC	Система IEEE 14	узел	-	14
		Мощность (МВАр)	-	-15.1218
	Система IEEE 30	узел	-	26
		Мощность (МВАр)	-	-27.5578
Время расчета (секунды)	Система IEEE 14	-	<b>11</b>	<b>30</b>
	Система IEEE 30	-	<b>17</b>	<b>37</b>

На рисунках 5, 6 показаны полученные недоминантные решения после установки SVC в модифицированных схемах IEEE 14 и IEEE 30 с использованием предложенного метода. Красным цветом выделено оптимальное решение, а черным - недоминантные решения.

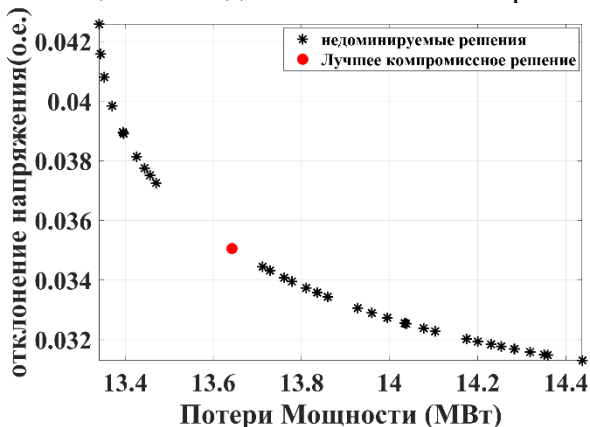


Рисунок 5 - Фронт Парето при установке SVC в системе IEEE 14

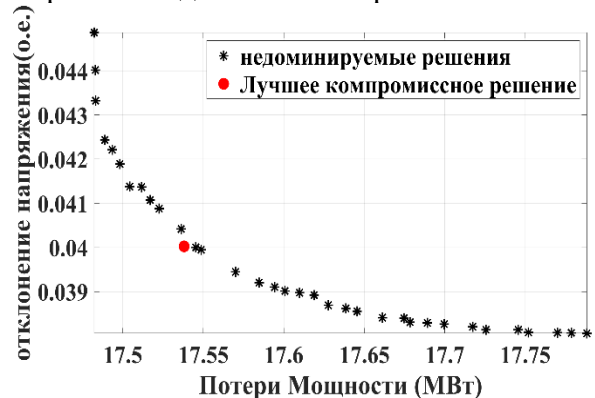


Рисунок 6 - Фронт Парето при установке SVC в системе IEEE 30

SVC в системе IEEE14 с использованием предложенного метода. SVC в системе IEEE 30 с использованием предложенного метода.

В следующем разделе этой главы рассматривается оптимизация работы энергосистемы с использованием новых разработанных в данной диссертации метаэвристических алгоритмов. Предложенные методы сравниваются с другими широко используемыми алгоритмами в литературе. Было выполнено множество примеров, в зависимости от типа используемого устройства FACTS и формулировки задачи оптимизации. Целевые функции были оптимизированы в форме одно- и многокритериальной оптимизации. Все случаи были протестированы на системах IEEE30 с тремя различными сценариями установки устройств FACTS: SVC, TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator) и UPFC (Unified power flow controller). Задача оптимизации имеет следующий вид:

$$\min[P_L, V_D, O_C],$$

$$P_L = \sum_{k=1}^{N_k} G_k (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \delta_{i,j}), \quad V_D = \sum_{i=1}^{NLB} (V_i - 1.0)^2, \quad O_C = (C_{PL} + C_{FACTS}),$$

$$C_{PL} = P_L \times 0.09 \times 365 \times 24,$$

$$C_{FACTS} = C_{SVC} + C_{TCSC} + C_{UPFC},$$

$$C_{SVC} = 0.0003S^2 + 0.3051S + 127.38,$$

$$C_{TCSC} = 0.0015S^2 - 0.7130S + 153.75,$$

$$C_{UPFC} = 0.0003S^2 - 0.2691S + 188.22$$

При размещении устройств FACTS учитывались следующие ограничения:

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{i,j} \sin \delta_{i,j} - B_{i,j} \cos \delta_{i,j}) = 0, \quad i = \overline{1, N},$$

$$P_{G_i} - P_{D_i} - \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{i,j} \cos \delta_{i,j} + B_{i,j} \sin \delta_{i,j}) = 0,$$

$$V_{i_{\min}} \leq V_i \leq V_{i_{\max}}, \quad S_{i,j} \leq S_{i,j_{\max}},$$

$$Q_{svc}^{\min} \leq Q_{svc} \leq Q_{svc}^{\max}, \quad X_{TCSC}^{\max} \leq X_{TCSC} \leq X_{TCSC}^{\min}$$

$$Q_{UPFC}^{\min} \leq Q_{UPFC} \leq Q_{UPFC}^{\max}$$

где  $P_L, V_D, O_C$  - потери активной мощности и отклонения напряжения и эксплуатационные расходы соответственно,  $N_k$  - общее количество линий электропередачи в ЭЭС,  $G_k$  - проводимость  $k$ -ой линии,  $V_i$  и  $V_j$  - величины напряжения в узлах  $i$  и  $j$  на концах  $k$ -ой линии,  $\delta_{i,j}$  - разность углов напряжений в узлах  $i$  и  $j$ ,  $N_{LB}$  - общее число нагрузочных узлов,  $C_{PL}$  и  $C_{FACTS}$  - годовая стоимость потерь мощности и стоимость (в долларах на КВАр) установки соответственно  $C_{SVC}$ ,  $C_{TCSC}$ ,  $C_{UPFC}$ ,  $Q_{G_i}$ ,  $P_{G_i}$ , - генерируемая реактивная и активная мощность в  $i$ -ом узле,  $Q_{D_i}$ ,  $P_{D_i}$  - реактивная и активная мощность нагрузки в  $i$ -ом узле,  $N$  - общее количество узлов,  $G_{i,j}$ ,  $B_{i,j}$  - активная и реактивная проводимости линий между узлами  $i$  и  $j$ ,  $V_{i_{\max}}$ ,  $V_{i_{\min}}$ , являются верхним и нижним пределами модуля напряжения в узле,  $S_{i,j_{\max}}$  представляют максимальный допустимый поток полной мощности в линии  $i-j$ , и  $S_{i,j}$  представляет собой поток полной мощности в линии  $i-j$ ,  $Q_{svc}^{\min}$  &  $Q_{svc}^{\max}$  пределы минимальной и максимальной реактивной мощности устройства SVC,  $X_{TCSC}^{\min}$  &  $X_{TCSC}^{\max}$  пределы минимального и максимального

реактивного сопротивления устройства TCSC device,  $Q_{UPFC}^{\min}$  и  $Q_{UPFC}^{\max}$  - пределы минимальной и максимальной реактивной мощности устройства UPFC.

### 1- Однокритериальная задача оптимизации

Каждая целевая функция оптимизируется отдельно при установке устройств FACTS на основе каждого из сравниваемых алгоритмов. Сравнимые алгоритмы включали методы PSO, SA, AGPSO, GWO, IGWO и AGPSO-GWO. В таблице 5 показаны оптимальные настройки SVC, полученные с помощью предложенных алгоритмов для снижения отклонения напряжения в узлах и потерь активной мощности в модифицированной схеме. Как показано в Таблице 4, мощность  $P_L$  снизилась с 7.44 до 6.7258 МВт. По сравнению с другими методами, предложенный метод AGPSO-GWO обеспечивает наименьшую мощность SVC для получения глобального минимального значения общих потерь активной мощности. Напротив, среди протестированных алгоритмов метод SA обеспечивает наибольшую мощность SVC. Таблица 4 также показывает, что предложенные алгоритмы (AGPSO-GWO, IGWO, AGPSO) уменьшают  $V_D$  от 0.0324 до 0.01271 о.е. Согласно результатам, когда  $P_L$  был выбран в качестве единственной целевой функции, установка SVC на основе предложенного метода улучшила работу сети за счет снижения потерь на 9.59 %. Более того, когда  $V_D$  был выбран в качестве единственной цели оптимизации, профиль напряжения улучшился за счет снижения  $V_D$  на 60.77%.

Таблица 4 — Оптимальное решение всех алгоритмов  $P_L$ ,  $V_D$ , и  $O_C$  для при установке только SVC в модифицированной системе IEEE 30.

	Без FACTS	$P_L$ как единственная целевая функция			$V_D$ как единственная целевая функция			$O_C$ как единственная целевая функция		
		7.44 МВт			0.0324 о.е.			5.867088 (\$, млн)		
Алгоритмы	Место расположения (Узел)	Мощность (МВАр)	$P_L$ (МВт)	Место расположения (Узел)	Мощность (МВАр)	$V_D$ (о.е.)	Место расположения (Узел)	Мощность (МВАр)	$O_C$ (\$, млн)	
SVC	SA [3]	8	-57.1700	6.7258	8	79.690	0.0141	-	-	-
	AGPSO	8	<b>-57.1655</b>	<b>6.7258</b>	6	-100	<b>0.01271</b>	8	-21.1183	<b>5.6462</b>
	IGWO	8	<b>-57.1655</b>	<b>6.7258</b>	6	-100	<b>0.01271</b>	8	-21.1183	<b>5.6462</b>
	AGPSO-GWO	8	<b>-57.1635</b>	<b>6.7258</b>	6	-100	<b>0.01271</b>	8	-21.1183	<b>5.6462</b>
	GWO	8	-57.1655	6.7265	6	-100	0.01271	8	-26.7726	5.6617
	PSO	8	-57.1655	6.7258	6	-100	0.01271	8	-21.1183	5.6462

С точки зрения финансов, предложенные методы обеспечивают экономичную работу сети, так как  $O_C$  снизился с  $5.8671 \cdot 10^6$  до  $5.6462 \cdot 10^6$  \$, как показано в таблице 4. Этот достигнутый результат показывает, что установка SVC с использованием предложенных методов снизила эксплуатационные расходы на 3.307 %. Сравнительные графики сходимости были использованы в качестве инструмента сравнения для демонстрации превосходства предложенных методов. Как показано на рисунках 7-9, предложенные методы (AGPSO\_GWO, IGWO, AGPSO) обеспечивают лучшее и более быстрое решение, чем любой другой метод

оптимизации. Отмечается, что алгоритм AGPSO-GWO дает лучшее и более быстрое решение, чем любой другой метод оптимизации. Также замечено, что алгоритм AGPSO-GWO находит глобальный экстремум за меньшее количество итераций по сравнению с другими алгоритмами.

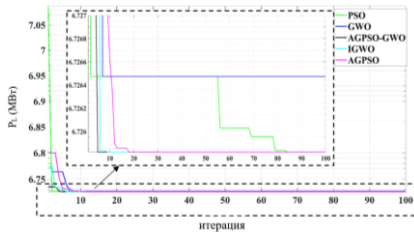


Рисунок 7 — Графики сходимости всех алгоритмов для установки SVC в системе для минимизации  $P_L$ .

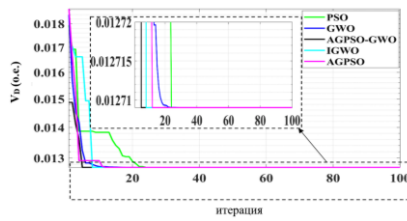


Рисунок 8 — Графики сходимости всех алгоритмов для установки SVC в системе для минимизации  $V_D$ .

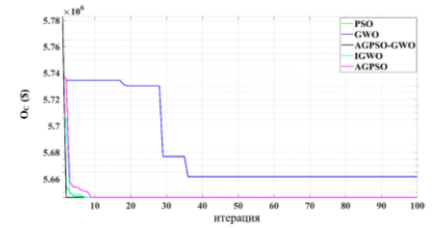


Рисунок 9 — Графики сходимости всех алгоритмов для установки SVC в системе для минимизации  $O_C$ .

Второй случай - это оптимальное объединение TCSC в системе для оптимизации рассматриваемых целевых функций. Как показано в таблице 5. Метод SA привел к снижению мощности  $P_L$  с 7.44 до 7.19 МВт. Оптимальное местоположение и мощность TCSC, предложенные другими сравниваемыми методами, уменьшают мощность  $P_L$  до 7.19 МВт.

Таблица 5 — Оптимальное решение всех алгоритмов  $P_L$ ,  $V_D$ , и  $O_C$  для при установке только TCSC в модифицированной системе IEEE 30.

	$P_L$ как единственная целевая функция			$V_D$ как единственная целевая функция			$O_C$ как единственная целевая функция		
	Без FACTS	7.44 МВт			0.0324 о.е.			5.867088 (\$, млн)	
Алгоритмы	Место расположения ( линия )	Мощность (МВАр)	$P_L$ (МВт)	Место расположения ( линия )	Мощность (МВАр)	$V_D$ (о.е.)	Место расположения ( линия )	Мощность (МВАр)	$O_C$ (\$, млн)
SA [3]	16	-0.799	<b>7.1960</b>	36	-0.7920	0.0254	-	-	-
AGPSO	16	-0.8	<b>7.1986</b>	36	-0.8	<b>0.0252</b>	11	-0.7253	<b>5.7975</b>
IGWO	16	-0.8	<b>7.1986</b>	36	-0.8	<b>0.0252</b>	11	-0.7253	<b>5.7975</b>
AGPSO-GWO	16	-0.8	<b>7.1986</b>	36	-0.8	<b>0.0252</b>	11	-0.7262	<b>5.7975</b>
GWO	16	-0.8	7.1986	36	-0.8	0.0252	11	-0.8	5.7995
PSO	16	-0.8	7.1986	16	-0.8	0.0273	11	-0.7253	5.7975

С другой стороны, предложенные методы минимизировали  $V_D$  до 0.03 о.е., в то время как SA и PSO достигли более высоких значений. Согласно финансовым аспектам, Таблица 5. показывает значительную экономию средств при установке TCSC на основе новых методов, где  $O_C$  уменьшился с  $5.87 \cdot 10^6$  до  $5.79 \cdot 10^6$  \$. Полученные результаты показывают, что установка TCSC на основе новых разработанных методов улучшает эффективность работы сети за счет снижения  $V_D$ ,  $P_L$  и  $O_C$  по отдельности на 21.05%, 3.24% и 1.19%, соответственно. На рис. 10-12 показаны сравнительные графики сходимости алгоритмов. Предложенные алгоритмы (AGPSO, IGWO, AGPSO-GWO) показали наилучшие результаты среди других сравниваемых алгоритмов. Предложенные методы получают глобальное решение за меньшее количество

итераций. Метод AGPSO-GWO превзошел все алгоритмы с высоким коэффициентом преобразования.

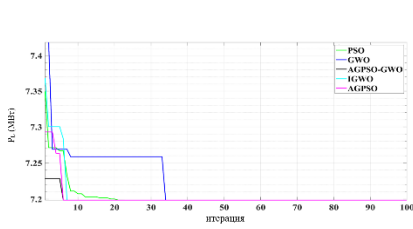


Рисунок 10 — Графики сходимости всех алгоритмов для установки TCSC в системе для минимизации  $P_L$ .

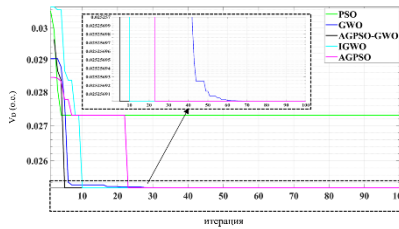


Рисунок 11 — Графики сходимости всех алгоритмов для установки TCSC в системе для минимизации  $V_D$ .

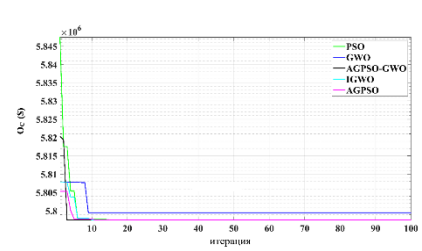


Рисунок 12 — Графики сходимости всех алгоритмов для установки TCSC в системе для минимизации  $O_C$ .

Таблица 6 — Оптимальное решение всех алгоритмов  $P_L$ ,  $V_D$ , и  $O_C$  для при установке только UPFC в модифицированной системе IEEE 30.

		$P_L$ как единственная целевая функция				$V_D$ как единственная целевая функция				$O_C$ как единственная целевая функция			
Без FACTS		7.44 МВт				0.0324 о.е.				5.867088 (\$, млн)			
UPFC	Алгоритмы	Место расположения		Мощность	$P_L$ (МВт)	Место расположения		Мощность	$V_D$ (о.е.)	Место расположения		Мощность	$O_C$ (\$, млн)
	узлы	линии	линии	линии		линии	линии	линии		линии			
UPFC	SA [3]	узел	9	-89.284	<b>6.5440</b>	узел	8	-99.8	0.0124	узел	-	-	-
		линия	11	-0.7474		линия	10	-0.6231		линия	-	-	
	AGPSO	узел	10	-71.7483	6.5565	узел	6	-99.6857	<b>0.0123</b>	узел	6	-18.2164	<b>5.6675</b>
		линия	12	-0.8		линия	12	-0.8		линия	11	-0.8	
	IGWO	узел	9	-88.3250	<b>6.5467</b>	узел	6	-99.6857	<b>0.0123</b>	узел	6	-18.2164	<b>5.6675</b>
		линия	11	-0.7247		линия	12	-0.8		линия	11	-0.8	
	<b>AGPSO-GWO</b>	узел	<b>9</b>	<b>-88.3249</b>	<b>6.5467</b>	узел	<b>6</b>	<b>-99.6857</b>	<b>0.0123</b>	узел	<b>6</b>	<b>-18.2146</b>	<b>5.6675</b>
		линия	<b>11</b>	<b>-0.7247</b>		линия	<b>12</b>	<b>-0.8</b>		линия	<b>11</b>	<b>-0.8</b>	
	GWO	узел	10	-88.3250	6.5991	узел	6	-100	0.0126	узел	8	-27.3498	5.7414
		линия	12	-0.8		линия	6	0.2		линия	40	0.1455	



PSO	узел	8	-57.1574	6.7258	узел	6	-99.6857	0.0127	узел	10	-16.0963	5.7394
	линия	40	0.0168		линия	41	0.2		линия	25	-0.263651	

Установка UPFC в системе является окончательным случаем для рассматриваемой однокритериальной задачи оптимизации. Как показано в Таблице 6,  $P_L$  уменьшилась до меньшего значения, чем при установке SVCили TCSC в системе. Подключение UPFC к системе с использованием метода SA дает значение  $P_L$ , равное 6.544 МВт. При меньшем размере UPFC, чем предлагается алгоритмами IGWO, AGPSO-GWO и AGPSO достигается 6.5467, 6.5467 и 6.5565 МВт, соответственно. Кроме того, в таблице 6 показано, что при подключении UPFC к системе с использованием алгоритмов IGWO, AGPSO и AGPSO-GWO,  $V_D$  снижается до минимального значения, равного 0.0123 о.е. Таблица 6. Также сообщается, что установка UPFC на основе алгоритмов AGPSO-GWO, IGWO и AGPSO минимизирует  $O_C$  до  $5.6675 \cdot 10^6$  \$. С другой стороны, оптимальное место установки и мощности UPFC на основе PSO и GWO привели к самым высоким значениям  $O_C$ , которые равны  $5.7394 \cdot 10^6$  и  $5.7414 \cdot 10^6$  \$, соответственно. Помимо улучшения характеристик энергосистемы, предложенные алгоритмы сокращают время вычислений, что приводит к определению глобального решения с меньшим количеством итераций, как показано на рис. 13-15. Подход AGPSO-GWO превосходит все остальные

алгоритмы по профилю сходимости и быстро достигает оптимального глобального решения.

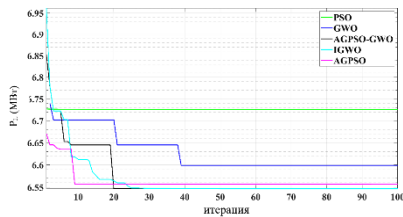


Рисунок 13 — Графики сходимости всех алгоритмов для установки UPFC в системе для минимизации  $P_L$ .

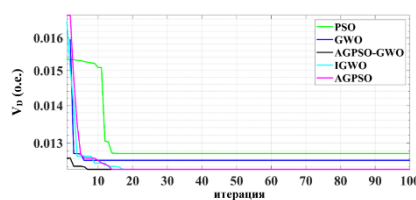


Рисунок 14 — Графики сходимости всех алгоритмов для установки UPFC в системе для минимизации  $V_D$ .

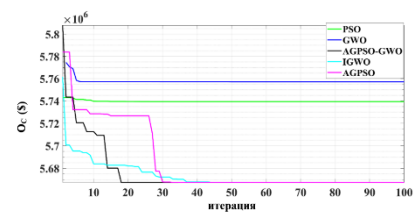


Рисунок 15 — Графики сходимости всех алгоритмов для установки UPFC в системе для минимизации  $O_C$ .

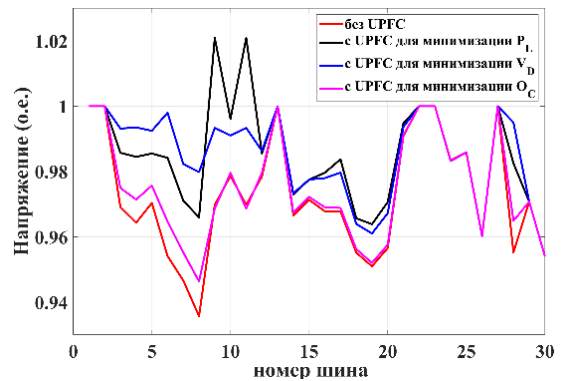


Рисунок 16 — Профиль напряжения в сети на

Согласно таблицам 4-6, установка UPFC достигает наилучших значений  $P_L$  и  $V_D$ . UPFC уменьшил  $P_L$  и  $V_D$  на 12.01% и 62.04%, соответственно. С другой стороны, SVC уменьшил  $P_L$  и  $V_D$  на 9.59% и 60%, соответственно, в то время как TCSC уменьшил  $P_L$  и  $V_D$  на 3.24% и 21.05%, соответственно. Эти результаты были достигнуты с помощью алгоритма AGPSO-GWO. На рис.15 показан профиль напряжения сети в зависимости от оптимального местоположения и мощности UPFC в системе с использованием алгоритма AGPSO-GWO. Как видно из рис.16, напряжение в узлах поддерживается в допустимых пределах, а профиль напряжения улучшен во всех случаях оптимизации. Как показано на рис.17, потери мощности в каждой линии снижаются при установке UPFC для снижения  $P_L$ . Установка UPFC для  $O_C$  оказывает меньшее влияние на снижение  $P_L$  на каждой линии.

основе оптимального расположения и размера UPFC в системе с использованием алгоритма AGPSO-GWO.

## 2- Многокритериальная задача оптимизации

Такая формулировка позволяет одновременно минимизировать потери, отклонение напряжения в узле и эксплуатационные расходы. Для поиска наилучшего компромиссного решения этой многокритериальной задачи оптимизации рассматриваются два случая: а) целевые функции объединяются в функцию оптимизации взвешенной суммы, и б) наилучшее компромиссное решение определяется с помощью методов АНР и TOPSIS из недоминантных решений фронта Парето. В задачах оптимизации с взвешенной суммой рассматриваемые целевые функции оптимизируются одновременно путем их объединения в одну целевую функцию  $F$ , как указано в (11):

$$F = w_1 \cdot J_1 + w_2 \cdot J_2 + w_3 \cdot J_3 \quad (11)$$

где  $w_1, w_2, w_3$  весовые коэффициенты для измерения вклада каждого члена в функцию пригодности.

$$J_1 = \frac{P_{L\_FACTS}}{P_{L\_base}}, J_2 = \frac{V_{D\_FACTS}}{V_{D\_base}}, J_3 = \frac{O_{C\_FACTS}}{O_{C\_base}} \quad (12)$$

где  $P_{L\_FACTS}$  и  $P_{L\_base}$  - потери активной мощности с подключением и без подключения устройства FACTS к энергосистеме,  $V_{D\_FACTS}$  и  $V_{D\_base}$  - отклонение напряжения с установкой и без установки контроллеров FACTS,  $O_{C\_FACTS}$  и  $O_{C\_base}$  - являются эксплуатационными расходами системы с установкой и без установки контроллеров FACTS. Для того чтобы выбрать наиболее подходящие значения весовых коэффициентов  $w$  в (11), различные комбинации весовых коэффициентов сравнивались во время установки SVC на системы IEEE 30 и 118 шин. Где весовые коэффициенты варьируются от 0 до 1, а сумма всех коэффициентов равна 1. Для схемы IEEE 30 шин, таблице 7 приведены результаты сравнения различных комбинаций весовых коэффициентов.

Таблица 7— Оптимальное решение алгоритма AGPSO-GWO при различных значениях весовых коэффициентов при установке SVC в системе IEEE 30.

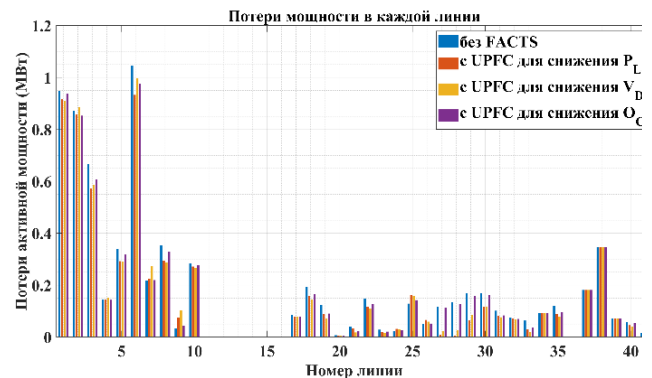


Рисунок 17 - потери активной мощности на каждой линии.

Весовые коэффициенты	F	Узел	Мощность SVC (MVAp)	O <sub>c</sub> (\$, млн)	P <sub>L</sub> (МВт)	V <sub>D</sub> (о.е.)
(1,1,1)	2.4965	8	-54.9657	6.1931	6.7268	0.0174
(0.8,0.1,0.1)	0.8825	8	-56.1313	6.2310	6.7260	0.0172
(0.1,0.8,0.1)	0.5745	8	-73.0000	6.9175	6.7744	0.0148
<b>(0.1, 0.1, 0.8)</b>	<b>0.9377</b>	<b>8</b>	<b>-28.5686</b>	<b>5.6732</b>	<b>6.8961</b>	<b>0.0232</b>
(0.7,0.2,0.1)	0.8433	8	-63.3989	6.4953	6.7335	0.0161
(0.2,0.7,0.1)	0.6198	8	-73.0000	6.9175	6.7744	0.0148
(0.2,0.1,0.7)	0.9334	8	-30.5925	5.6897	6.8724	0.0226
(0.6,0.3,0.1)	0.8009	8	-69.6569	6.7611	6.7562	0.0152
(0.3,0.6,0.1)	0.6652	8	-73.0000	6.9175	6.7744	0.0148
(0.1,0.3,0.6)	0.9284	8	-33.0394	5.7150	6.8461	0.0220
(0.6,0.2,0.2)	0.8610	8	-55.4875	6.2099	6.7264	0.0173
(0.2,0.2,0.6)	0.9027	8	-37.8722	5.7817	6.8021	0.0208
(0.2,0.6,0.2)	0.6920	8	-73.0000	6.9175	6.7744	0.0148
(0.5,0.1,0.4)	0.9155	8	-38.8247	5.7974	6.7947	0.0206
(0.5,0.4,0.1)	0.7559	8	-73.0000	6.9175	6.7744	0.0148
(0.5,0.2,0.3)	0.8748	8	-48.6472	6.0094	6.7404	0.0186
(0.5,0.3,0.2)	0.8224	8	-61.3813	6.4171	6.7293	0.0164
(0.1,0.5,0.4)	0.7800	8	-59.1743	6.3358	6.7266	0.0167
(0.4,0.1,0.5)	0.9226	8	-34.4230	5.7318	6.8325	0.0217
(0.3,0.5,0.2)	0.7374	8	-71.7734	6.8590	6.7673	0.0150
(0.2,0.3,0.5)	0.8649	8	-47.8983	5.9901	6.7431	0.0187

Коэффициенты 0.1, 0.1 и 0.8 были выбраны на основе результатов сравнения. В отличие от других случаев в Таблице 7, эти значения обеспечивают баланс значений P<sub>L</sub>, V<sub>D</sub> и O<sub>c</sub>, которые ниже, чем в базовом случае, а также наименьшую мощность SVC. В случае метода MCDM, алгоритм AGPSO-GWO используется для получения недоминируемых решений (расположение и размер устройств FACTS). Затем используется метод TOPSIS для упорядочивания полученных оптимальных решений. Метод АНР используется для определения относительной важности рассматриваемых целей. Матрица парных сравнений была задана, как показано в таблице 8, что дало оптимальные значения весов 0.22, 0.11 и 0.67. Были исследованы три случая установки устройства FACTS в системах IEEE 30: SVC, TCSC и UPFC на основе алгоритма AGPSO-GWO. В таблице 9 представлены полученные результаты. Для исследованных случаев метод MCDM достиг более низких значений для P<sub>L</sub> и V<sub>D</sub>, чем метод взвешенной суммы.

Кроме того, в таблице 9 показано, что при установке SVCс использованием метода MCDM достигаются самые низкие значения P<sub>L</sub> и V<sub>D</sub> одновременно.

Использование метода MCDM для выбора местоположения и мощности SVCснизило P<sub>L</sub> и V<sub>D</sub> до 6.78 МВт и 0.0203 о.е., соответственно, по сравнению с 6.89 МВт и 0.032 о.е. для метода взвешенной суммы. По данным O<sub>c</sub>, метод MCDM достиг более высоких значений, чем другие методы, со снижением до 5.82\*10<sup>6</sup> \$ для случая SVCпо сравнению с 5.67\*10<sup>6</sup> \$ для другого метода, и до 5.85, 5.80\*10<sup>6</sup> \$

Таблица 8 — Матрица парных сравнений

	O <sub>c</sub>	P <sub>L</sub>	V <sub>D</sub>
O <sub>c</sub>	1	3	6
P <sub>L</sub>	1/3	1	2
V <sub>D</sub>	1/6	1/2	1

для TCSC и UPFC, соответственно, по сравнению с  $5.82$  и  $5.70 \cdot 10^6$  \$ для метода взвешенной суммы. Рисунок 16 иллюстрирует значения снижения целей после установки устройств FACTS с помощью методов MCDM и взвешенной суммы. Рисунок 16. значения снижения целевых функций после установки устройств FACTS с использованием методов MCDM и взвешенной суммы.

Таблица 9 — Полученные результаты многоцелевой оптимизации для системы IEEE 30 с помощью методов MCDM и взвешенной суммы.

	MCDM метод			метод взвешенной суммы		
	$P_L$ (МВт)	$V_D$ (о.е.)	$O_C$ (\$, млн)	$P_L$ (МВт)	$V_D$ (о.е.)	$O_C$ (\$, млн)
при установке SVC	6.7838	0.0203	5.8236	6.8961	0.0232	5.6732
при установке TCSC	7.2183	0.0278	5.8541	7.2542	0.0286	5.8234
при установке UPFC	6.9090	0.0227	5.8010	6.9120	0.0241	5.7054

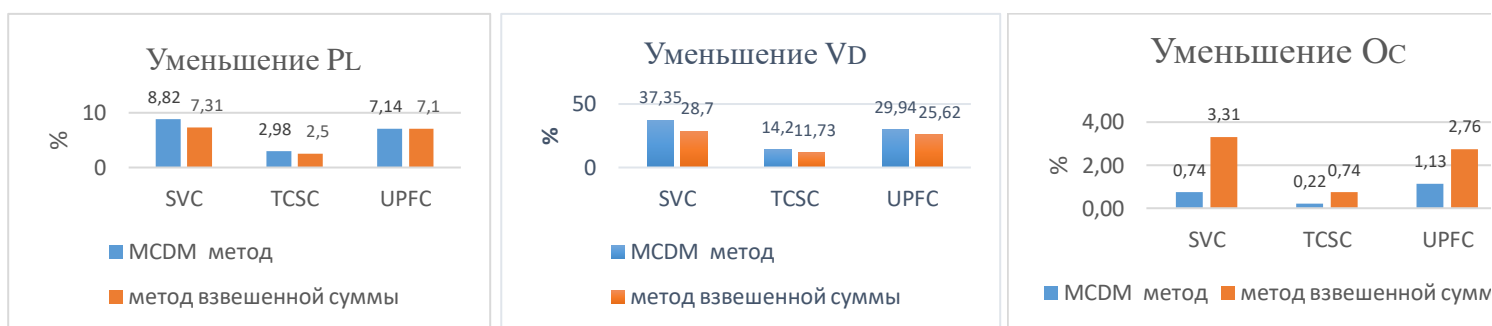


Рисунок 16 — значения снижения целей после установки устройств FACTS с использованием методов MCDM и взвешенной суммы.

Для случая системы 118 шин IEEE, базового варианта без подключения устройств FACTS к сети, значения  $P_L$ ,  $V_D$  и  $O_C$  составляют 132.8629 МВт, 0.0866 о.е. и  $1.0475 \cdot 10^8$  \$, соответственно. В таблице 9 представлены результаты сравнения различных комбинаций весовых коэффициентов. По результатам сравнения были выбраны коэффициенты 0.1, 0.1 и 0.8. В отличие от других случаев в таблице 10, эти значения обеспечивают баланс более низких значений  $P_L$ ,  $V_D$  и  $O_C$ , а также наименьшей мощности установки устройства SVC. Матрица парных сравнений метода MCDM, как показано в таблице 8, дала оптимальные значения весов 0.22, 0.22, 0.11 и 0.67.

Таблица 10 — Оптимальное решение алгоритма AGPSO-GWO при различных значениях весовых коэффициентов при установке SVC в системе IEEE 118.

Весовые коэффициенты	F	Узел	Мощность SVC (МВАp)	$O_C$ (\$)	$P_L$ (МВт)	$V_D$ (о.е.)
(1,1,1)	2.9464	52	-45.3705	$1.0554 \cdot 10^8$	133.1035	0.0811
(0.8,0.1,0.1)	0.9953	52	-33.3965	$1.0511 \cdot 10^8$	132.9149	0.0820
(0.1,0.8,0.1)	0.9466	52	-63.4427	$1.0647 \cdot 10^8$	133.5398	0.0806
<b>(0.1, 0.1, 0.8)</b>	<b>0.9973</b>	<b>52</b>	<b>-13.3092</b>	<b><math>1.0474 \cdot 10^8</math></b>	<b>132.7948</b>	<b>0.0843</b>
(0.7,0.2,0.1)	0.9894	52	-43.7966	$1.0548 \cdot 10^8$	133.0740	0.0812
(0.2,0.7,0.1)	0.9540	52	-61.9732	$1.0638 \cdot 10^8$	133.4979	0.0806
(0.2,0.1,0.7)	0.9966	52	-23.5326	$1.0488 \cdot 10^8$	132.8239	0.0830

(0.6,0.3,0.1)	0.9828	52	-50.1218	$1.0575 \cdot 10^8$	133.2011	0.0809
(0.3,0.6,0.1)	0.9614	52	-60.2165	$1.0628 \cdot 10^8$	133.4492	0.0806
(0.1,0.3,0.6)	0.9965	52	-23.9170	$1.0488 \cdot 10^8$	132.8263	0.0829
(0.6,0.2,0.2)	0.9899	52	-41.5569	$1.0539 \cdot 10^8$	133.0344	0.0813
(0.2,0.2,0.6)	0.9916	52	-37.9717	$1.0526 \cdot 10^8$	132.9771	0.0816
(0.2,0.6,0.2)	0.9624	52	-58.4684	$1.0618 \cdot 10^8$	133.4023	0.0806
(0.5,0.1,0.4)	0.9961	52	-27.9666	$1.0497 \cdot 10^8$	132.8574	0.0825
(0.5,0.4,0.1)	0.9758	52	-54.5703	$1.0597 \cdot 10^8$	133.3037	0.0807
(0.5,0.2,0.3)	0.9904	52	-39.7436	$1.0532 \cdot 10^8$	133.0045	0.0815
(0.5,0.3,0.2)	0.9835	52	-48.0636	$1.0566 \cdot 10^8$	133.1573	0.0810
(0.1,0.5,0.4)	0.9718	52	-60.3827	$1.0629 \cdot 10^8$	133.4537	0.0806
(0.4,0.1,0.5)	0.9963	52	-26.8111	$1.0494 \cdot 10^8$	132.8475	0.0826
(0.3,0.5,0.2)	0.9696	52	-55.6604	$1.0603 \cdot 10^8$	133.3304	0.0807
(0.2,0.3,0.5)	0.9852	52	-42.6402	$1.0543 \cdot 10^8$	133.0532	0.0813

Результаты применения предложенных методов для оптимизации производительности системы шин IEEE118 показаны в таблице 11. Согласно методу MCDM, TCSC достиг более низких значений  $P_L$  и  $O_C$ , чем другие устройства, которые уменьшились на 1.757 % и 1.317 %, соответственно. Кроме того, устройство UPFC достигло наименьшего значения снижения отклонения напряжения 3.533 %. С другой стороны, при использовании метода взвешенной суммы, UPFC достиг наименьших значений  $P_L$  и  $O_C$ , которые уменьшились на 2.169% и 1.862%, соответственно, а SVC получил наименьшее значение  $V_D$ , которое уменьшилось на 2.656%. Таблица 11 показывает, что предложенные методы MCDM и взвешенная комбинация успешно снижают цели, оставаясь при этом ниже базового варианта.

Таблица 11 — Полученные результаты многоцелевой оптимизации для системы IEEE 118 с помощью методов MCDM и взвешенной суммы.

	MCDM метод			метод взвешенной суммы		
	$P_L$ (МВт)	$V_D$ (о.е.)	$O_C$ (\$)	$P_L$ (МВт)	$V_D$ (о.е.)	$O_C$ (\$)
при установке SVC	132.7832	0.0863	$1.047 \cdot 10^8$	132.7948	0.0843	$1.0474 \cdot 10^8$
при установке TCSC	130.5292	0.0859	$1.0337 \cdot 10^8$	130.4395	0.0858	$1.0337 \cdot 10^8$
при установке UPFC	131.48660	0.0856	$1.0419 \cdot 10^8$	129.9798	0.0854	$1.0280 \cdot 10^8$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Методы оптимизации, содержащие плохо обусловленную систему для повышения режимов ЭЭС с помощью управляемых устройств FACTS, дают неточные результаты. В данной работе предложен метод получения точных результатов от плохо обусловленной системы с использованием процедуры повторных измерений и характеристик линейности этой системы через дробно-полиномиальные зависимости.

2. Применение дробно-полиномиальных зависимостей оптимизирует расчет различных параметров режима ЭЭС, что существенно повышает эффективность решения ряда обратных задач, связанных с выбором параметров оборудования FACTS-устройств или оптимизацией конфигурации ЭЭС, а также некоторых других задач, характеризующихся высокой вычислительной сложностью.

3. Предложенный метод применен к тестовым схемам IEEE 14 и IEEE 30. Согласно результатам, полученным с помощью предложенного метода, относительная ошибка значительно снизилась, упав с 800% и 1000% для IEEE14 и IEEE30, соответственно, до менее 5% для всех испытанных систем. Кроме того, разработанный метод сокращает время расчета для определения оптимальной мощности и расположения устройств FACTS в энергосистеме на 60%.

4. Критический анализ существующих эвристических методов оптимизации размещения устройств FACTS в сетях энергосистем показал наличие ряда недостатков в используемых методах оптимизации, таких как недостаточная надежность определения оптимального решения и большое количество итераций.

5. Разработан новый метаэвристический метод оптимизации, основанный на гибриде алгоритмов AGPSO и GWO, названный AGPSO-GWO. Разработанный метод позволяет устранить недостатки классических методов и достичь оптимального глобального решения с высокой скоростью сходимости и малым числом итераций.

6. Исчерпывающее сравнение нового алгоритма оптимизации с аналогами, приведенными в современной литературе на основе различных тестовых схем IEEE, показывает, что алгоритм AGPSO-GWO имеет самую высокую скорость сходимости и высокую надежность определения глобального оптимума, при 50% экономии времени расчета по сравнению с другими методами.

7. Предложенные методы реализуются для многих случаев в зависимости от типа используемого устройства FACTS и постановки задачи оптимизации. Эффективность работы энергосистемы повышается за счет минимизации потерь активной мощности ( $P_L$ ), отклонения напряжения ( $V_D$ ) и эксплуатационных издержек ( $O_C$ ). Эти целевые функции были оптимизированы в форме одно- и многокритериальной оптимизации. Все случаи были протестированы с тремя различными сценариями установки устройств FACTS: SVC, TCSC и UPFC.

8. Согласно полученным результатам, установка UPFC на основе AGPSO-GWO достигает наилучших значений  $P_L$  и  $V_D$ . При этом UPFC снижает  $P_L$  и  $V_D$  на 12.01% и 62.04%, соответственно. С другой стороны, SVC уменьшил  $P_L$  и  $V_D$  на 9.59% и 60%, соответственно, в то время как TCSC уменьшил  $P_L$  и  $V_D$  на 3.24% и 21.05%, соответственно. TCSC имеет наименьшее влияние на  $O_C$ , которое имеет более высокое значение снижения, достигнутое до 1.19%, в то время как SVC и UPFC достигли 3.77%, 3.40%, соответственно.

9. Применение метода MCDM (АНР и TOPSIS) для определения наилучшего компромиссного решения для определения оптимального размещения устройств FACTS обеспечивает более низкие значения  $P_L$  и  $V_D$ , чем метод взвешенных сумм для всех исследованных многоцелевых задач оптимизации. Оптимальное решение, выбранное методом MCDM для системы IEEE 30 шин, снизило  $P_L$  и  $V_D$  на 8.82 и 37.35%, соответственно, по сравнению с 7.31 и 28.71% для другого метода. Однако  $O_C$  для метода MCDM выше, с уменьшением на 0.74 % по сравнению с 3.31 % для метода взвешенных сумм.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИСЕРТАЦИИ

- A1. **Ahmed. A. Shehata**, Mohamed A. Tolba, Ali El-Rifaie, and N. V. Korovkin, "Power System Operation Enhancement using a New Hybrid Methodology for Optimal Allocation of FACTS Devices, " Energy Reports. Elsevier, 2022. Vol. 8. P. 217–238. **(Scopus, Q1)**.
- A2. **A. A. Shehata**, A. Refaat, M. K. Ahmed, and N. V. Korovkin, "Optimal placement and sizing of FACTS devices based on Autonomous Groups Particle Swarm Optimization technique, " Arch. Elec. Eng., vol. 70, no. 1, pp. 161–172, 2021. **(Scopus, Q3)**

- A3. **A. A. Shehata** and M. K. Ahmed, "State estimation accuracy enhancement for optimal power system steady state modes, " IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. **(Scopus)**
- A4. **A. A. Shehata** and N. V. Korovkin, "An Accuracy Enhancement of Optimization Techniques Containing Fractional-Polynomial Relationships," 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5. **(Scopus)**
- A5. **A. A. Shehata**, A. Refaat and N. V. Korovkin, "Optimal Allocation of FACTS Devices based on Multi-Objective Multi-Verse Optimizer Algorithm for Multi-Objective Power System Optimization Problems," 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2020, pp. 1-7. **(Scopus)**
- A6. **A. A. Shehata**, N. V. Korovkin, Mohamed A. Tolba, and Vladimir N. Tulsy, "Efficient Utilization of the Power Grid using FACTS devices based on a new Metaheuristic Optimizer," 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2021, pp. 1-7. **(Scopus)**
- A7. K. A. Mamdouh, **A. A. Shehata**, and N.V. Korovkin, "Multi-objective voltage control and reactive power optimization based on multi-objective particle swarm algorithm, " IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. **(Scopus)**
- A8. K. A. Mamdouh, **A. A. Shehata**, M. H. Osman, and N. V. Korovkin, "A Solution of Optimal Power Flow Problem in Power System Based on Multi Objective Particle Swarm Algorithm," 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021, pp. 1349-1353. **(Scopus)**
- A9. **A. A. Shehata**, A. Refaat, M. Elgamal and N. V. Korovkin, "Current Collector Optimizer Topology with Reconfiguration Algorithm to Harvest Optimal Power from Nonuniform Aged PV Arrays," 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2020, pp. 1-7. **(Scopus)**
- A10. **Ahmed. A. Shehata**, Mohamed Elgamal, Abdulla H. Ebrahim, and Ahmed Refaat, "New Heuristic Hybrid Algorithm for Optimal Allocation of FACTS Controllers in Power Systems," International Scientific Electric Power Conference (ISEPC-2021), 2021, **в печати**
- A11. **Ahmed A. Shehata**, Mohamed Elgamal, Abdulla H. Ebrahim, and N. V. Korovkin, "Optimal installation of SVC using an Analytical-based Approach for Improving Power System Performance," International Scientific Electric Power Conference (ISEPC-2021), 2021, **в печати**

#### **СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Behzadian M. et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications // Expert Systems with Applications. 2012. Vol. 39, № 17.
2. Saaty T.L. What is the Analytic Hierarchy Process? // Mathematical Models for Decision Support. 1988.
3. Kanaan H.A.M., Mehanna M.A.A. Application of Simulates Annealing Algorithm for Optimal Location and Sizing of FACTS Devices Considering System Losses and Voltage Division // Int. J. Adv. Sci. Technol. 2020. Vol. 29, № 6. P. 5279–5289.