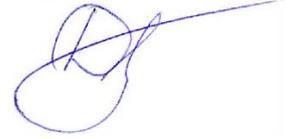


На правах рукописи



Якубовский Дмитрий Викторович

**МОДИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
МИНИМИЗАЦИИ ДЕФИЦИТА МОЩНОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный кандидат технических наук,
руководитель: **Крупенёв Дмитрий Сергеевич**

Официальные **Коровкин Николай Владимирович**
оппоненты: доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Институт энергетики, Высшая школа высоковольтной энергетики, профессор

Горский Сергей Алексеевич
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук, Лаборатория параллельных и распределенных вычислительных систем, старший научный сотрудник

Ведущая Федеральное государственное бюджетное образовательное
организация: учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита состоится «14» сентября 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте <https://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2022-8/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130 на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 003.017.01,
доктор технических наук, профессор



Клер
Александр Матвеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из важнейших свойств, характеризующих электроэнергетические системы (ЭЭС) является балансовая надежность (БН), заключающаяся в способности поставлять электроэнергию потребителям в нужном объеме и требуемого качества в определенный момент времени с учетом незапланированных перерывов в работе, а также различных ограничений и воздействий. Обеспечение требуемого уровня БН является одной из актуальных задач энергетики и, в свою очередь, способствует сбалансированному развитию экономики.

Своевременная оценка БН позволяет обосновать необходимый уровень резервов различных видов и делать необходимые корректировки по планам ввода новых и вывода устаревших или аварийных элементов системы, непосредственно, на этапе планирования развития ЭЭС. Совокупность этих мер напрямую влияет на снижение разных видов ущерба, из-за отказов энергетического оборудования. Однако, мероприятия, связанные с формированием дополнительных резервов мощности и заменой устаревших или аварийных элементов системы, являются затратными и требуют квалифицированной оценки и объективного обоснования их проведения. Именно поэтому для решения представленных задач необходимо проводить оценку БН перспективных схем ЭЭС и на её основе корректировать планы развития.

Одним из основных методов, на основании которого проводится оценка БН, является метод статистических испытаний (Монте-Карло). Методика оценки на его основе включает в себя многократное имитационное моделирование работы ЭЭС, оптимизацию расчетных состояний ЭЭС и вычисление комплекса показателей балансовой надежности (ПБН), которые имеют экономическую интерпретацию и в дальнейшем подвергаются анализу.

В ходе оценки БН формируется большое число случайных состояний ЭЭС, с разными наборами рабочего энергетического оборудования, уровнем потребления мощности. Для каждого из этих состояний вычисляется минимум дефицита мощности в системе и зонах надёжности. По итогу анализа всех случайных состояний вычисляются ПБН. Данные вычисления в зависимости от размера и сложности исследуемой ЭЭС являются время- и трудозатратными операциями, что в конечном итоге сказывается на объеме затрачиваемых ресурсов, времени и эффективности применения полученных ПБН для решения последующих задач. Одной из таких задач является определение оптимальных резервов генерирующих мощностей при планировании развития ЭЭС. При решении этой задачи требуется проводить многократную оценку БН всей системы для проверки соблюдения требований надёжности электроснабжения при корректировке воздействий на обеспечение надёжности ЭЭС. Такие объемные расчеты приводят к необоснованно высоким затратам времени на решение этой задачи, что снижает эффективность всего процесса планирования развития ЭЭС. К тому же при решении задачи минимизации дефицита мощности необходимо максимально точно отражать процессы, протекающие в ЭЭС, что приводит к

усложнению математической модели минимизации дефицита мощности, так как требуется проводить учет дополнительных ограничений.

Таким образом, учитывая важность исследований БН ЭЭС применение физически адекватных математических моделей и эффективных, с точки зрения затрачиваемого времени и ресурсов, методов оптимизации создаёт возможность повысить скорость и точность определения минимумов дефицитов мощности ЭЭС, и является актуальной задачей.

В диссертационной работе предлагается несколько модификаций математических моделей минимизации дефицита мощности, используемых при оценке балансовой надежности ЭЭС и повышающих адекватность представления процессов, происходящих в ЭЭС, а также расширяющих область их применения с учетом контролируемых сечений и матрицы сетевых коэффициентов. Для решения сложных многоэкстремальных задач минимизации дефицита мощности предлагается использовать группы методов градиентного спуска и группы методов дифференциальной эволюции с их модификациями. Предлагаемые математические модели и методы получили реализацию и применение в рамках внешней динамически подключаемой библиотеки блока оптимизации, интегрируемой в программный комплекс для оценки балансовой надёжности.

Степень разработанности проблемы. Исследованию задач и методологии оценки БН ЭЭС уделялось и уделяется значительное внимание. Так в разные годы вопросами развития методологии оценки БН и разработкой математических моделей, применяемых для минимизации дефицита мощности, занимались и привнесли свой вклад такие ученые как: Ю.Н. Руденко, О.И. Александров, Н.А. Беляев, Н.И. Воропай, Г.А. Волков, И.И. Дикин, В.И. Зоркальцев, В.Г. Китушин, Г.Ф. Ковалев, Н.В. Коровкин, Д.С. Крупенёв, Ю.Н. Кучеров, Л.М. Лебедева, Н.А. Манов, В.В. Могирев, В.А. Обоскалов, С.М. Пержабинский, М.Н. Розанов, М.Ю. Чукреев, Ю.Я. Чукреев, за рубежом – Р. Биллингтон (R. Billington), В. Ли (W. Li), Р. Алан (R. Allan), К. Чу (K. Chu), Дж. МакКалей (J. McCalley), М. Папик (M. Papic), И. Хонг (Y. Hong) и др.

Разработки и исследования численных методов, а именно группы методов градиентного спуска, а также группы методов дифференциальной эволюции, как правило проводились отдельно в рамках исследований общего теоретического и прикладного характера. Вопросами развития методов дифференциальной эволюции в основном занимались следующие ученые: разработчики – К. Прайс (K. Price), Р. Сторн (R. Storn), исследователи – А.В. Пантелеев, Дж. Холланд (J. Holland), Дж. Лампинен (J. Lampinen) и др.

Цель работы: разработка адекватных реальным условиям функционирования ЭЭС математических моделей минимизации дефицита мощности и применение эффективных методов оптимизации и технологий распараллеливания для их решения.

Задачи работы:

1. Провести анализ текущего состояния и направлений развития программных комплексов в области балансовой надежности ЭЭС, а именно

методологии, математических моделей минимизации дефицита мощности и методов оптимизации.

2. Модернизировать математическую модель минимизации дефицита мощности в соответствии с адекватным, физически корректным распределением перетоков мощности.

3. Разработать физически адекватную математическую модель минимизации дефицита мощности, учитывающую дополнительные ограничения в контролируемых сечениях и матрицу сетевых коэффициентов.

4. Сравнить корректность работы и эффективность группы градиентных методов оптимизации и методов дифференциальной эволюции для минимизации дефицита мощности.

5. Модернизировать метод дифференциальной эволюции для повышения его эффективности с точки зрения скорости сходимости при решении задачи минимизации дефицита мощности.

6. Разработать и реализовать программный комплекс для оценки балансовой надежности ЭЭС методом Монте-Карло с учетом возможностей подключения внешней динамической библиотеки, включающей в себя:

- адекватные математические модели минимизации дефицита мощности с учетом контролируемых сечений;
- группу методов оптимизации с применением градиентного спуска и дифференциальной эволюции с реализацией параллельных вычислений.

7. Провести апробацию разработанных и модифицированных математических моделей, методов и программного комплекса на схемах ЭЭС разной размерности.

Объект исследования. Электроэнергетические системы разной размерности со сложной структурой, представляемые и реализуемые математическими моделями минимизации дефицита мощности, с возможностью их анализа в рамках оценки балансовой надежности.

Предмет исследования. Математические модели минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем, методы оптимизации, применяемые для минимизации дефицитов мощности, а также методы построения программных комплексов для исследования систем энергетики.

Научная новизна. Заключается в разработке и модернизации математических моделей и методов минимизации дефицита мощности, а также их реализации в программном комплексе и основана на следующих результатах работы:

1. Варианты модификации математических моделей минимизации дефицита мощности: с дополнительными ограничениями на перетоки мощности, соответствующие физически корректному потокораспределению в ЭЭС, с учетом ограничения пропускной способности по контролируемым сечениям, с использованием матрицы сетевых коэффициентов (МСК) и квадратичных потерь мощности;

2. Сформулирован подход к эффективному с точки зрения время и трудозатрат использованию двухэтапной оптимизации для получения минимума дефицита и физически корректного потокораспределения;

3. Модифицирован метод дифференциальной эволюции в направлении внедрения системы коррекции элементов мутантных векторов популяции;

4. Разработана внешняя динамически подключаемая библиотека оптимизации для минимизации дефицита мощности, интегрируемая в программный комплекс оценки балансовой надёжности ЭЭС.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость работы определяется повышением адекватности математических моделей минимизации дефицита мощности, используемых при оценке балансовой надёжности ЭЭС методом Монте-Карло, реальным условиям функционирования ЭЭС, а также в модификации повышения скорости сходимости метода.

Практическая значимость работы. Разработанные математические модели, численные методы и их модификации были программно реализованы в виде динамической программной библиотеки пакетной оптимизации, входящей в состав программного комплекса «Надёжность». Все программные реализации были зарегистрированы в государственном реестре программ для ЭВМ федеральной службы по интеллектуальной собственности. С помощью данного комплекса выполнялись различные расчеты для схем существующих электроэнергетических систем, в том числе при выполнении НИР «Разработка порядка определения величины нормативного резерва генерирующих мощностей в Единой энергетической системе России и изолированных энергосистемах» между ИСЭМ СО РАН и Ассоциацией «НП Совет рынка», а также при выполнении базового проекта ИСЭМ СО РАН (FWEU-2021-0003) «Методические основы и модельно-инструментальные средства исследования проблем энергетической безопасности при формировании вариантов развития ТЭК».

Соответствие диссертации паспорту специальности. Задачи и результаты исследований диссертации соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ в соответствии со следующими пунктами:

П.3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

П.4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

П.5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Методы и средства исследования: методы математического моделирования, метод Монте-Карло, численные методы оптимизации: градиентный спуск, наискорейший спуск, метод сопряженных градиентов, метод дифференциальной эволюции, адаптивной дифференциальной эволюции, хаотической дифференциальной эволюции, композитной дифференциальной

эволюции; линейный поиск по правилу Армихо, метод генерации псевдослучайных чисел (Mersenne Twister), математический анализ, теория математического и компьютерного моделирования, технологии объектно-ориентированного программирования и др. Для исследований на языке C++ (стандарта C++20) а также набора средств Boost::Python описана динамически подключаемая библиотека блока оптимизации, включающая в себя вышеописанные модели и методы, с возможностью ее внедрения в приложение для оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем, которое было разработано на языке программирования Python 3.6.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработка комплекса математических моделей минимизации дефицита мощности, включающего:

- математическую модель с использованием дополнительных ограничений на перетоки мощности, которые не допускают появления двусторонних потоков мощности на связях;

- математические модели для двухэтапной оптимизации, на основании которых возможно получить не только глобальный минимум дефицита мощности, но и оптимальное потокораспределение в ЭЭС;

- математическую модель с учетом ограничений пропускных способностей по контролируемым сечениям в виде максимально и аварийно допустимых потоков активной мощности;

- математические модели, включающие использование матрицы сетевых коэффициентов и учета контролируемых сечений.

2. Модификация метода дифференциальной эволюции путем внедрения дополнительной системы коррекции элементов мутантных векторов популяции для повышения скорости вычислений и реализации их параллельного выполнения.

3. Динамически подключаемая библиотека оптимизации с применением разработанных и модифицированных моделей и методов, предназначенная для использования в программном комплексе оценки балансовой надёжности ЭЭС методом Монте-Карло.

Личный вклад. В работах, опубликованных в неделимом соавторстве, соискателем была проведена модификация и программная реализация математических моделей и методов оптимизации, используемых для минимизации дефицитов мощности ЭЭС, разработка компьютерных программ и библиотек, интегрируемых в программный комплекс оценки балансовой надёжности ЭЭС, анализ и обобщение результатов. Формулировки задач и направлений исследований, интерпретация результатов, а также разработка моделей минимизации дефицита мощности выполнялись совместно с руководителем.

Достоверность научных исследований подтверждается воспроизводимостью результатов, практическими расчётами реальных электроэнергетических систем, обсуждением на различных международных и всероссийских конференциях.

Апробация результатов исследования. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях:

Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко, «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики» заседание 88, 4-9 июля 2016 года, г. Сыктывкар; Семинары в рамках международной программы молодых ученых Young Scientists Summer Program, IASA, 29 мая – 31 августа 2017 года, Австрия, г. Лаксенбург; Конференция по программе УМНИК в Иркутской области «Байкал – территория инноваций», 08.11.2017 года, г. Иркутск; XLVIII конференция-конкурс научной молодёжи «Системные исследования в энергетике», 26 - 29 марта 2018 года, г. Иркутск; XXIII Байкальская всероссийская конференция «Информационные и математические технологии в науке и управлении», 29 июня - 8 июля 2018 года, п. Курма (Иркутская обл.); Всероссийская молодежная конференция "Системные исследования в энергетике - 2019", 27 - 31 Мая 2019 года, г. Иркутск; ISSE 2021 - 7th IEEE International Symposium on Systems Engineering, Vienna, Austria, 2021, а также на семинарах и заседаниях секций Ученого совета ИСЭМ СО РАН.

Предполагаемые формы внедрения ожидаемых результатов. Использование программно-вычислительного комплекса для оценки балансовой надёжности ЭЭС при планировании развития реальных электроэнергетических систем.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, из которых 2 в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.13.18 (технические науки), 14 – в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus (2 статьи в журналах Q1, 1 статья в журнале Q2), 5 – свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав и заключения. Текст научно-квалификационной работы изложен на 155 страницах, содержит 14 рисунков и 13 таблиц. Список использованных литературных источников включает 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи, обозначен объект и предмет исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, основные положения и результаты исследования, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются основные характеристики проблемы обеспечения балансовой надёжности (БН) ЭЭС и методика для ее оценки, где применяется поэтапное моделирование ЭЭС на основании метода Монте-Карло. Также, представлен обзор отечественных и зарубежных программных средств оценки БН и краткая характеристика современных математических моделей и численных методов оптимизации используемых в комплексах для решения поставленных задач.

Методика оценки балансовой надёжности состоит из нескольких вычислительных блоков: *подготовительный блок*, направлен на сбор, актуализацию и систематизацию объема данных о ЭЭС, в том числе проводится

определение коэффициентов аварийности элементов, графики их ремонтов, графики нагрузки разных временных периодов; *вероятностный блок*, в котором проводится формирование состояний ЭЭС на расчетный период, где на основании метода Монте-Карло формируются состояния системы и случайным образом, на основании исходных данных, выбираются исключаемые из работы элементы, величина нагрузки в зонах надёжности, а также проводится учет плановых ремонтов генерирующего оборудования; *блок оптимизации* сформированных состояний предназначен для расчета дефицита мощности в системе, где каждое ранее сформированное состояние ЭЭС обрабатывается и представляется в соответствии с математической моделью, после чего осуществляется минимизация дефицита мощности (МДМ); *блок вычисления показателей балансовой надёжности*, в котором обрабатывается вся накопленная информация о дефицитах в зоне надёжности и загрузке элементов ЭЭС, после чего вычисляются показатели балансовой надёжности и другие характеристики подлежащие анализу.

Был проведен анализ современных зарубежных и отечественных программных комплексов, предназначенных для оценки балансовой надёжности ЭЭС. В большинстве своем проанализированные комплексы являются закрытым программным обеспечением с платной лицензией и функциональностью, основанной на работе линейных моделей. Такой подход приводит к снижению точности расчетов, т.к. существует обоснованный вывод, что модель, где потери мощности зависят от квадрата передаваемой мощности, является более адекватной моделью, близкой по физическому смыслу к реальной работе ЭЭС.

Несмотря на вариативность рассмотренных моделей, целью некоторых из них является минимизация затрат и учет экономических показателей, что, в свою очередь, существенно влияет на итоговый результат, который может отличаться от расчетов минимизации дефицитов мощности, изначально предназначенных для оценки балансовой надёжности. Также, ввиду того, что линейные модели приводят к менее точным результатам, используемые в современных комплексах потоковые методы и методы решения линейных задач можно считать существенным недостатком, снижающим необходимый уровень точности оценки БН. В то же время при анализе нелинейных моделей применяемые ресурсозатратные методы с линеаризацией могут привести к снижению уровня точности результата и неэффективному использованию вычислительных ресурсов.

Во второй главе представлена подробная характеристика существующих моделей МДМ, в том числе рассматриваются разработанные модели МДМ, с учетом предлагаемых модификаций. Кроме того, в главе представлены численные методы оптимизации для решения поставленных задач, а также предложены модификации метода дифференциальной эволюции.

Содержательно задача минимизации дефицита мощности при оценке балансовой надёжности ЭЭС может быть сформулирована следующим образом: *для известных значений работоспособных генераторных мощностей, требуемых уровней нагрузок потребителей, пропускных способностей связей ЭЭС и коэффициентов потерь активной мощности в линиях электропередачи ЭЭС необходимо определить минимум суммы дефицитов мощности с учетом*

корректного потокораспределения. Модель МДМ с квадратичными потерями может быть представлена в следующем виде:

$$\min_{y,x,z} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i), \quad (1)$$

при соблюдении балансовых ограничений:

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji}z_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

а также ограничений на оптимизируемые переменные:

$$0 \leq y_i \leq \bar{y}_i, i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$0 \leq x_i \leq \bar{x}_i, i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

$$0 \leq z_{ji} \leq \bar{z}_{ji}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j, \quad (5)$$

$$a_{ji} = \frac{r_{ji}}{U_{\text{ном}}^2 \cos^2 \varphi_{ji}}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j, \quad (6)$$

где: x_i – используемая генерирующая мощность в зоне надёжности i (МВт); \bar{x}_i – располагаемая генерирующая мощность в зоне надёжности i (МВт); y_i – обеспечиваемая в зоне надёжности i нагрузка (МВт); \bar{y}_i – прогнозная величина нагрузки в зоне надёжности i (МВт); z_{ij} – поток мощности из зоны надёжности i в зону надёжности j (МВт); z_{ji} – поток мощности из зоны надёжности j в зону надёжности i (МВт); \bar{z}_{ji} – пропускная способность ЛЭП между зонами надёжности j и i (МВт); a_{ji} – коэффициенты удельных потерь активной мощности в ЛЭП при ее передаче из зоны надёжности j в зону надёжности i ; r_{ji} – активное сопротивление линии электропередачи между зонами надёжности j и i (Ом/км); $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение линии электропередачи между зонами надёжности j и i (кВ); $\cos \varphi_{ji}$ – коэффициент мощности линии электропередачи между зонами надёжности j и i (обычно принимается равным 0,9).

Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями, устранение встречных перетоков мощности. Получаемые оптимальные решения с помощью модели МДМ (1) – (6) (далее МДМ₁) не обладают необходимой адекватностью с позиции физики процесса потокораспределения. В решении этой задачи могут присутствовать встречные перетоки мощности по межзонам связям. Также, в некоторых случаях трудно найти единственное решение из-за наличия «плато» или множества оптимальных решений. Таким образом, результаты работы модели МДМ₁ при оценке БН могут привести к искажению значений показателей надёжности. Для устранения этой проблемы было сформулировано дополнительное ограничение для перетоков мощности, широко известное в оптимизации, как «обнуление переменной», в данном случае ограничение представлено в следующем виде:

$$z_{ji} \cdot z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j. \quad (7)$$

Таким образом, ограничение (7) преобразует рассматриваемую задачу в корректную с точки зрения моделирования работы перетоков мощности между ЗН

и меняет поведение модели на более правильное с позиции физики процесса потокораспределения, а также формирует модифицированную модель МДМ с квадратичными потерями (1) – (7) (далее МДМ₂).

Двухэтапная оптимизация при минимизации дефицита мощности. Экспериментальные исследования показали, что несмотря на модификацию нелинейной модели и её представление в виде МДМ₂, ввиду наличия множества оптимальных решений существуют решения с неверным потокораспределением мощности, заключающимся в появлении кольцевых перетоков мощности, при корректно найденном минимуме дефицита мощности. Иначе говоря – потокораспределение не является оптимальным, однако, исходя из содержательной постановки задачи, требуется найти не только минимум дефицита мощности, но и корректное потокораспределение.

Для решения этой проблемы был предложен ряд модификаций модели. В первую очередь путем изменения балансовых ограничений типа равенств (2) – на ограничения типа неравенств. Данное ограничение предусматривало переход модели оценки дефицита мощности к виду задачи выпуклого программирования.

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji}z_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

По итогу исследований было выявлено, что при применении балансовых ограничений типа неравенств может быть однозначно определён минимум дефицита мощности. При этом физически неверное распределение перетоков мощности остается, а также повышается загрузка генераторных мощностей до максимума по заданным ограничениям, что физически невозможно, так как по факту избытки генераторной мощности заперты и нет потребителей, которые могут удовлетворить такому предложению.

В качестве решения возникшей проблемы предлагается использовать второй этап оптимизации. Так, на первом этапе проводится оптимизация обозначенной модели (1), (3) – (8), такой подход обеспечит выпуклое множество допустимых решений. Далее, полученные оптимальные решения относительно переменной y_i фиксируются и обозначается новая переменная \tilde{y}_i . После чего происходит переход ко второму этапу решения, сформировав новую целевую функцию, которая характеризуется минимизацией суммы квадратов перетоков мощности (евклидова норма):

$$\sum_{i=1}^n z_{ji}^2 \rightarrow \min, j = 1, \dots, n, \quad (9)$$

а также заменить текущие балансовые ограничения (8) на модифицированные балансовые ограничения:

$$x_i - \tilde{y}_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji}z_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n. \quad (10)$$

Работоспособность данного подхода двухэтапной оптимизации модели с балансовыми ограничениями неравенствами (1), (3) – (8) и модели минимизации

евклидовой нормы по перетокам (1), (3) – (7), (9), (10) была экспериментально проверена и показала корректность результатов.

Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями и с учетом контролируемых сечений. Важным моментом при минимизации дефицита мощности является учет корректных ограничений на переменные. Так, определение пропускной способности межзонных связей является достаточно сложной задачей, которая решается путём расчета устойчивости энергосистем. В практике управления энергосистемами проводят учет контролируемых сечений (КС). Ограничения пропускной способности для КС рассчитывают для контролируемых сечений в виде максимально и аварийно допустимых перетоков активной мощности (МДП и АДП соответственно). Межзонные связи и контролируемые сечения с заданной характеристикой МДП мощности могут как совпадать по составу ЛЭП, входящих в них, так и не совпадать. В связи с этим предлагается модифицировать существующую модель МДМ₂.

В первую очередь необходимо сформировать матрицу S контролируемых сечений, в которой присутствуют ветви в КС с учетом их направлений. Размер матрицы $l \times m$, где l – число КС, а m – число ветвей, элементы матрицы обозначим:

$$cS_{kf} = \begin{cases} 1, & \text{если ветвь присутствует в контр – ом сечении} \\ 0, & \text{если ветвь отсутствует в контр – ом сечении} \end{cases} \quad (11)$$

Каждое контролируемое сечение имеет МДП в прямом и обратном направлениях. Для их хранения необходима матрица M размера $l \times 2$, где первый элемент (md_{k1}) в строке содержит значения прямого МДП, второй элемент (md_{k2}) – обратного МДП. В модель также требуется внести ограничения по КС, для прямого и обратного МДП.

$$\sum_{f=1}^m cS_{kf} \cdot z_f^{\text{прям}} \leq md_{k1}, k = 1, \dots, l, \quad (12)$$

$$\sum_{f=1}^m cS_{kf} \cdot z_f^{\text{обп}} \leq md_{k2}, k = 1, \dots, l, \quad (13)$$

$$\left(\sum_{f=1}^m cS_{kf} \cdot z_f^{\text{прям}} \right) \cdot \left(\sum_{f=1}^m cS_{kf} \cdot z_f^{\text{обп}} \right) = 0, k = 1, \dots, l, \quad (14)$$

где $z_f^{\text{прям}}$ – прямой переток мощности по ветви (МВт), т.е. z_{ij} ; $z_f^{\text{обп}}$ – обратный переток мощности по ветви (МВт), т.е. z_{ji} , которые определяются при формировании матрицы S ; k – порядковый номер контролируемого сечения. Таким образом, существующая модель МДМ₂ (1) – (7) должна быть преобразована в модель (1) – (6), (11) – (14) для моделирования работы и загрузки контролируемых сечений, далее МДМ₃.

Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями и матрицей сетевых коэффициентов. Еще одной модификацией модели МДМ является постановка с использованием нелинейной модели и матрицы сетевых

коэффициентов (МСК), или матрицы чувствительности первого порядка, отражающих зависимость изменения перетоков мощности по межзональным связям от изменения баланса мощности в зонах надёжности ЭЭС. Применение матриц сетевых коэффициентов обусловлено стремлением отразить реально возможное потокораспределение ЭЭС, которое зависит от многих факторов, в том числе от реактивного сопротивления ветвей.

Основу модели составляет МДМ₂, учитываются как сетевые коэффициенты, так и квадратичные потери мощности, модель представляется с видоизмененными балансовыми ограничениями вида:

$$z_{ij} = \sum_{i=1}^I m_{ij,i} \cdot (x_i - y_i), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^I x_i = \sum_{i=1}^I y_i + \sum_{j=1}^J a_{ji} z_{ji}^2, i = 1, \dots, n, \quad (16)$$

где $m_{ij,i}$ – коэффициент распределения потока мощности из i -й зоны в балансирующую зону на связь между зонами i и j ЭЭС, определяемый расчетами установившихся электроэнергетических режимов. Таким образом, предлагается рассмотреть модель (1), (3) – (7), (15), (16).

В случае использования в задаче МДМ ограничений по контролируемым сечениям, в представленных выше постановках задачи минимизации дефицита мощности, они используются вместо ограничений по межзональным связям. Модель (1), (3) – (7), (15), (16) была испытана на тестовых схемах и показала свою адекватность с точки зрения физически корректного потокораспределения.

Помимо математических моделей МДМ во второй главе рассматривались методы оптимизации, используемые для решения задач, сформулированных на основе этих моделей. Определение минимума дефицита мощности расчетных состояний ЭЭС является еще одной важной составляющей работы второго этапа оценки балансовой надёжности при применении метода Монте-Карло. Качество результатов, в том числе скорость и точность расчета, возможность решения задач с растущим числом оптимизируемых параметров зависит от применяемого метода и постановки математической модели. Необходимо также учесть, что в результате вычислительных экспериментов решения задач, формируемых представленными ранее нелинейными математическими моделями минимизации дефицита мощности, получались множества решений для конкретного состояния системы. Каждое решение из множества, в свою очередь, является корректным, т.к. при подстановке полученного решения в исходные уравнения задачи удовлетворяются все ограничения равенства и неравенства. В том числе такое множество локальных решений получалось в ходе контрольных расчетов с помощью математического пакета GAMS и нелинейного решателя CONOPT. На основании экспериментальных расчетов, а также наличия «обнулённых» ограничений равенств, можно сделать обоснованный вывод о том, что задача является многоэкстремальной.

С учетом найденных недостатков существующих отечественных и зарубежных программных комплексов, а также необходимости избавиться от тяжеловесных вычислений с целью повышения скорости вычисления и возможности решения многоэкстремальных задач, было предложено реализовать и исследовать работоспособность группы градиентных методов и группы методов дифференциальной эволюции относительно разработанных моделей МДМ, в том числе с применением технологий распараллеливания.

Метод штрафных функций для задачи минимизации дефицита мощности. Обозначенные ранее группа градиентных методов и группа методов дифференциальной эволюции предназначены для решения задач безусловной оптимизации (оптимизация только целевой функции, без ограничений), поэтому существует необходимость обхода данного ограничения. Метод штрафных функций является одним из вариантов решения данной проблемы и может быть применен к задачам оптимизации с различными типами ограничений. Основные изменения претерпевает целевая функция, к которой добавляются ограничения в виде штрафных функций. Таким образом, изменения в системе могут привести к тому, что сработает штрафная функция, значение которой начнет резко возрастать. В таком случае, реакция на штраф будет регулироваться методом оптимизации, и в конечном итоге, функция будет направлена к искомому решению.

Применение группы градиентных методов к задаче минимизации дефицита мощности. В качестве методов первого порядка были выбраны метод градиентного спуска, наискорейшего градиентного спуска и метод сопряженных градиентов. Таким образом, одной из задач диссертации являлось сравнение работы и эффективности группы градиентных методов оптимизации применительно к задаче минимизации дефицита мощности.

В первую очередь был реализован метод градиентного спуска, который является основой для последующих вариантов градиентных методов. Все присущие особенности были учтены, в том числе настройка шага и выход по разным критериям останова. В качестве критериев останова учитывались следующие: приращение целевой функции не меняется $\|f(X_{h+1}) - f(X_h)\| < Eps$; градиент целевой функции в точке локального минимума приближается к нулю $\|F'(X_h)\| < Eps$, где h – итерация спуска, Eps – требуемая точность. Однако, проведенные расчеты показали, что эффективность данного метода сильно зависит от выбранного начального приближения и величины шага, также наблюдалось расхождение метода и попадание в локальные минимумы.

Для повышения эффективности решения задач следующим был реализован метод наискорейшего градиентного спуска. Основное отличие от предыдущего метода – наличие системы автоматического подбора шага, основная идея которого заключается в вычислении его величины методом одномерной оптимизации. В качестве такого метода был реализован линейный поиск по правилу Армихо. Несмотря на то, что теоретическая скорость сходимости метода наискорейшего спуска не выше скорости сходимости градиентного метода с постоянным (оптимальным) шагом, в сравнении с методом градиентного спуска повысилась скорость сходимости метода в рамках исследуемых моделей, а именно – снизилось

количество затрачиваемых итераций и счетного времени, увеличился доступный к оптимизации объем искомых параметров. Однако проблема останова метода в локальных минимумах все еще оставалась.

В связи с существенными недостатками применяемых методов был реализован и исследован метод сопряженных градиентов. Данный метод является дальнейшим развитием метода наискорейшего спуска, который сочетает в себе два понятия: градиент целевой функции и сопряженное направление векторов. В общем случае процесс нахождения минимума функции также является итерационной процедурой, однако основное отличие – применение вектора сопряженного направления вместо антиградиента. Метод сопряженных градиентов формирует направление поиска к оптимальному значению, используя информацию о поиске, полученную на предыдущих этапах спуска.

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение методов градиентного спуска для решения задачи минимизации дефицита мощности – возможно. Однако, для получения точного результата, необходимо применение технологии множественных запусков, которые приводят к увеличению времени расчета и затрачиваемым вычислительным ресурсам.

Применение группы методов дифференциальной эволюции к задаче минимизации дефицита мощности. С целью добиться большей скорости поиска приближения к глобальному решению задачи минимизации дефицита мощности был применен метод *Дифференциальной эволюции* (в англ. лит. Differential evolution далее DE), который является методом многомерной математической оптимизации, относится к классу стохастических алгоритмов оптимизации и использует некоторые идеи генетических алгоритмов, не требуя работы с переменными в бинарном коде. Данный метод имеет различные вариации самонастройки, что делает его более универсальным и позволяет классифицировать как группу методов.

Алгоритм ведет поиск пространства с решением, поддерживая популяцию возможных решений (отдельных векторов, возможных решений) и создавая новые, комбинируя существующие вектора в соответствии с процессом мутации, скрещивания и выбора. Кандидаты с лучшими целевыми значениями сохраняются на следующей итерации алгоритма таким образом, что новая объективная ценность индивидуума улучшается, образуя более подходящие популяции. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет удовлетворен заданный критерий останова. Алгоритм метода дифференциальной эволюции представляет собой легко модифицируемый конструктор из нескольких последовательных блоков:

Блок 1 включает в себя определение начальных значений параметров – N : количество элементов в векторе (решении), NP : размер популяции, число особей $NP = N * m$, где $5 \leq m \leq 15$, F : фактор мутации $[0.1, 1.0]$, CR : вероятность скрещивания $[0.0, 1.0]$, P_max : максимальное количество поколений, выясняется эмпирическим путем, либо выставляется максимально допустимое целое число ограниченное типом данных, G : текущий номер поколения;

Блок 2 – отвечает за инициализацию начальной популяции, по равномерному распределению;

Блок 3 – операция мутации, в данном случае понимается формирование нового вектора мутанта и вычисление значения его целевой функции в рамках определенной стратегии мутации с применением параметра F. На практике же существует и применяется множество различных стратегий мутации, в том числе:

$$\text{DE/best/1: } x_G^{mut} = x_G^{best} + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}), \quad (17)$$

$$\text{DE/rand/1: } x_G^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}), \quad (18)$$

$$\text{DE/current to rand/1: } x_G^{mut} = x_G^i + F(x_G^{r1} - x_G^i) + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}), \quad (19)$$

$$\text{DE/current to best/1: } x_G^{mut} = x_G^i + F(x_G^{best} - x_G^i) + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}), \quad (20)$$

$$\text{DE/rand/2: } x_G^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}) + F(x_G^{r4} - x_G^{r5}), \quad (21)$$

Блок 4 – операция скрещивания, где с учетом параметра CR из мутантного и целевого векторов, поэлементно формируется новый trial вектор.

Блок 5 – блок выбора завершает процедуру формирования нового члена популяции, выбирается вектор, продолжающий существование – trial вектор или целевой, определение происходит за счет сравнения значений целевых функций.

Для достижения большей универсальности в рамках изменяющихся моделей, а также количества переменных для разных систем были реализованы и проанализированы различные подходы к самонастройке метода DE. В рамках анализа проверялись методы DE, композитный - coDE, самонастраивающийся - jDE, хаотический - chDE, самонастраивающийся - JADE, а также адаптивный - aDE.

В ходе исследований, aDE показал себя как наиболее стабильный с точки зрения получения результатов для разных математических моделей вариант метода DE, с алгоритмом которого можно ознакомиться ниже:

Алгоритм 1: Псевдокод метода aDE.	
N = размерность задачи; NP = N*10; P_max = 50000;	
$f_{avg} = 0$; G = 1; P_G = инициализация популяции случайными числами;	
$F_{pool\ G}$ = инициализация rand (0.1, 1.0) для каждого вектора;	
$CR_{pool\ G}$ = инициализация rand (0.0, 1.0) для каждого вектора	
while (критерий останова не удовлетворен или G≠P_max) do	
best = определить лучший вектор	
for i with each individual x_G^i in P_G do	
x_G^{mut} = Мутация (Стратегия мутации, $F_{pool\ G}^i$, x_G^i , best)	
u_G^i = Скрещивание ($CR_{pool\ G}^i$, x_G^i , x_G^{mut})	
x_{G+1}^i = Выбор (x_G^i , u_G^i)	
f_{avg} = определить среднее значение целевой ф-ии в популяции;	
$F_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} F_{G+1}^i & \text{if } f(x_G^i) < f_{avg} \\ \text{случ. число}(0.1, 1.0), & \text{в ост. случаях} \end{cases}$;	
$CR_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} CR_{G+1}^i & \text{if } f(x_G^i) < f_{avg} \\ \text{случ. число}(0.0, 1.0), & \text{в ост. случаях} \end{cases}$;	
end for	
G= G+1	
end while	

Модификации внутренних блоков методов дифференциальной эволюции. В ходе экспериментов было обнаружено, что существующие подходы к проверке и замене выходящих за пределы ограничений значений векторов после процедуры мутации малоэффективны.

В основе процедуры мутации лежит формирование нового вектора мутанта с помощью случайно выбранных векторов, а также следованию стратегии мутации. Вместе с тем в литературных источниках отсутствует разбор ситуации, где элементы получившегося мутантного вектора выходят за пределы установленных верхних или нижних ограничений.

Алгоритм 2: Процедура мутации метода DE
i – индекс целевого вектора в популяции; while ($r1 == i$) do $r1 = \text{случ. число}(NP - 1)$; while ($r2 == i$ или $r2 == r1$) do $r2 = \text{случ. число}(NP - 1)$; while ($r3 == i$ или $r3 == r2$ или $r3 == r1$) do $r3 = \text{случ. число}(NP - 1)$; for j от 0 до N $x_{G,j}^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3})$; end for

В качестве модификации предлагается дополнительный этап проверки соответствия получившегося элемента вектора требуемым ограничениям по переменным. Всего предлагаются два варианта модификации, если условие не выполняется. В первом случае – сформировать значение данного элемента путем генерации случайного числа в рамках верхних и нижних ограничений.

Алгоритм 3: Модификация алгоритма процедуры мутации №1
i – индекс целевого вектора в популяции; while ... for j от 0 до N $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^{r1} + F(x_{G,j}^{r2} - x_{G,j}^{r3})$; if $x_{G,j}^{mut} < x_{G,j}^L$ или $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ then $x_{G,j}^{mut} = \text{случ. число}(x_{G,j}^L, x_{G,j}^U)$; end if end for

Такое дополнение ускорило поиск решения на 5%, однако был опробован второй вариант модификации, в случае несоответствия условиям сформировать значение данного элемента путем присвоения значения ограничения, которое было нарушено.

Алгоритм 4: Модификация алгоритма процедуры мутации №2
i – индекс целевого вектора в популяции; while ... for j от 0 до N $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^{r1} + F(x_{G,j}^{r2} - x_{G,j}^{r3})$; if $x_{G,j}^{mut} < x_{G,j}^L$ then $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^L$; else if $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ then $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^U$ end if end for

Результаты работы модифицированных методов показывали стабильные корректные решения. Итоговое время работы при решении задачи минимизации дефицита мощности, по сравнению с методами DE со стандартным блоком мутации, было снижено в среднем на 8%.

В третьей главе рассмотрены этапы создания динамически подключаемой библиотеки блока оптимизации, интегрируемой с программным комплексом «Надежность» для имитационного моделирования работы ЭЭС с целью оценки балансовой надёжности. Структура разрабатываемого комплекса оценки балансовой надёжности во многом была определена самим процессом расчетов по методике оценки балансовой надёжности, и ранее частично была реализована в программном комплексе «ЯНТАРЬ», который алгоритмически поделён на несколько последовательных модулей с происходящими внутри операциями, в соответствии с рассмотренными ранее блоками, зависящими от предыдущих.

Программный комплекс «Надёжность» (рисунок 1) включает в себя подпрограмму вычисления аварийности оборудования (C#), подпрограмму формирования прогнозных графиков нагрузки (C#) и головную программу оценки балансовой надёжности (Python 3.6); в которую интегрируется динамически подключаемая библиотека блока оптимизации (C++), по технологии Boost:Python.



Рисунок 1 – Структура программного комплекса «Надёжность» для оценки балансовой надёжности ЭЭС

Основа построения библиотеки прорабатывалась для возможности ее использования с различными математическими моделями и методами оптимизации, которые в последствии могли быть изменены или расширены. Для этого была предложена архитектура, выделяющая два направления – математические модели и методы оптимизации, где требовалось чтобы методы оптимизации могли быть использованы при решении задач, основанных на различных вариантах моделей МДМ, без необходимости изменения методов оптимизации.

К моделям МДМ был применен приём выделения абстракции, которая содержит в себе все необходимые и общие свойства, параметры и методы, которые могут содержаться в любой наследуемой модели МДМ, для этого был выделен абстрактный базовый класс `ProblemB`, который является родительским классом для всех наследующих его моделей МДМ, задачи на основании которых быть решены методами оптимизации, в том числе модели МДМ используемых в виде наследуемых классов `PPowerShortage_penalty` и `PPowerShortageCut_penalty` отражающих сущность модели МДМ с квадратичными потерями мощности при перетоках мощности и модели с учетом контролируемых сечений.

Реализация классов, отвечающих за методы оптимизации, проводилась с использованием подходов объектно-ориентированного программирования (ООП), однако, в данном случае, несмотря на возможность применения сложных паттернов или структур, необходимость в их применении отсутствовала. Общая концепция подразумевает, что существует класс метода оптимизации, который, в свою очередь, включает в себя необходимые переменные и параметры реализующие данный метод, а также имеет конструктор или метод инициализации, который принимает на вход ссылку на базовый класс моделей МДМ. Таким образом метод оптимизации может решать любые задачи на основании математических моделей, унаследованные от базового класса моделей.

Технологии распараллеливания, применяемые в динамически подключаемой библиотеке. Метод дифференциальной эволюции представляет собой итерационный процесс создания новых, улучшенных поколений (наборов решений) с применением мутаций, скрещивания и выбора. Основная идея для реализации данного механизма заключается в параллельном формировании новых векторов популяции, что допустимо ввиду отсутствия их прямой зависимости друг от друга. В данном случае единственным ограничением является необходимость доступа всех потоков на чтение одного массива с векторами текущей популяции, а также запись новых векторов популяции следующего поколения. В общем смысле алгоритм работы методов DE не менялся, меняется реализация. Таким образом для работы механизмов распараллеливания были реализованы два подхода с использованием открытого стандарта для распараллеливания программ на языке программирования C, C++ (OpenMP), с использованием `#pragma` директив компилятора для распараллеливания циклов и реализации стандартов языка C++ 11/17/20 (`std::Thread`), а также механизм синхронизации работы потоков `std::mutex`.

В четвертой главе анализируются результаты исследований, проведенных с помощью разработанной динамически подключаемой библиотеки, интегрируемой

в программный комплекс для оценки балансовой надежности ЭЭС «Надёжность». В рамках экспериментов исследовались модели минимизации дефицита мощности с квадратичными потерями и их модифицированные версии с учетом контролируемых сечений. Эксперименты проводились последовательно с постепенным увеличением размерности, анализируемых тестовых систем (ТС). Также в ходе экспериментов анализировались рассматриваемые методы оптимизации на предмет скорости и корректности решения поставленных задач. В качестве ТС, использовались системы с 3-я (ТС₁), 7-ю (ТС₂) и 24-я (ТС₃) зонами надежности, которые представлены на рисунке 2.

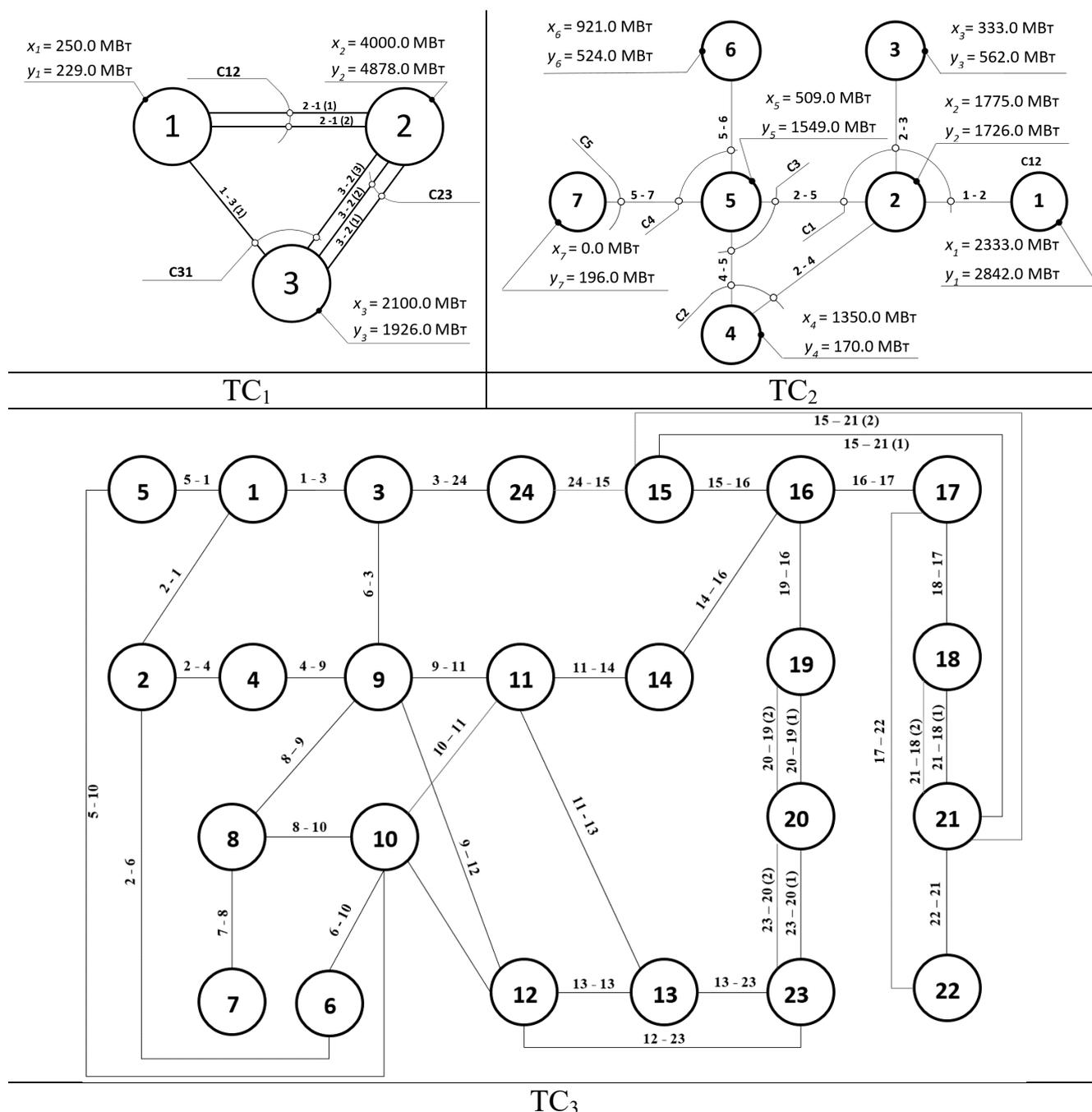


Рисунок 2 – Схемы исследуемых тестовых систем, где С – контролируемое сечение, x – располагаемая генерирующая мощность в зоне надёжности, y – прогнозная величина нагрузки в зоне надёжности

Для каждой ТС, схемы которых представлены на рисунке 2, последовательно применялись рассматриваемые методы оптимизации. Проверка корректности работы рассматриваемых методов оптимизации проводилась на основании результатов, получаемых специализированным математическим пакетом GAMS с использованием нелинейного решателя CONOPT. В результате экспериментов решения найденные с помощью библиотеки блока оптимизации являлись идентичными решениями, полученными в GAMS.

Для показательного сравнения эффективности работы группы градиентных методов и методов дифференциальной эволюции (таблица 1) была выбрана модель с квадратичными потерями мощности при перетоках (МДМ₂), на основании которой были поставлены задачи для всех вариантов схем ТС показанных на рисунке 2.

Таблица 1 – Сравнение времени расчета градиентными методами и методами дифференциальной эволюции для ТС, МДМ₂

Метод оптимизации	Точность	Время расчета для ТС ₁ (мсек)	Время расчета для ТС ₂ (мсек)	Время расчета для ТС ₃ (мсек)
Градиентный спуск, штрафные функции (3 итерации)	3e-10	10 143	168 000	-
Наискорейший спуск, штрафные функции (3 итерации)	3e-10	5 689	25 000	-
Сопряженных градиентов, штрафные функции (3 итерации)	3e-13	1 997	3 711	137 000
Метод aDE, мутация DE/rand/1, штрафные функции (1 итерация)	3e-13	61	3 551	12 794
Модифицированный метод aDE, мутация DE/rand/1, штрафные функции (1 итерация)	3e-13	56	3 337	11 847
Метод jDE, мутация DE/best/1, штрафные функции (1 итерация)	3e-13	97	2 226	25 070
Модифицированный метод jDE, мутация DE/best/1, штрафные функции (1 итерация)	3e-13	89	2 062	23 211

По итогу анализа результатов, наилучшие показатели эффективности были достигнуты связкой модифицированного метода адаптивной дифференциальной эволюции (aDE) и стратегии мутации DE/rand/1. Было зафиксировано снижение времени счета до 8% для модифицированных методов дифференциальной эволюции по сравнению с соответствующими методами без модификаций. Улучшение результата времени расчета в среднем на 30% возможно за счет применения технологии распараллеливания, что также было определено в рамках экспериментов.

Полученные результаты показывают эффективность модифицированных методов дифференциальной эволюции в решении задач поставленных на основании разработанных математических моделей.

В заключении приведены выводы и обобщены основные результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ текущего состояния и направлений развития программных комплексов в области балансовой надежности;
2. Выполнена модернизация математической модели минимизации дефицита мощности в соответствии с адекватным, физически корректным распределением перетоков мощности.
3. Выполнена разработка физически адекватной математической модели минимизации дефицита мощности, учитывающей дополнительные ограничения в контролируемых сечениях и матрицу сетевых коэффициентов.
4. Выполнено сравнение корректности работы и эффективности группы градиентных методов оптимизации и методов дифференциальной эволюции для минимизации дефицита мощности.
5. Выполнена модернизация метода дифференциальной эволюции для повышения его эффективности с точки зрения скорости сходимости при решении задачи минимизации дефицита мощности.
6. Выполнена разработка программного комплекса для оценки балансовой надежности ЭЭС методом Монте-Карло с учетом возможностей подключения внешней динамически подключаемой библиотеки блока оптимизации.
7. Выполнена апробация разработанных и модифицированных математических моделей, методов и программного комплекса на схемах ЭЭС разной размерности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 05.13.18:

1. Бояркин Д.А. Использование методов машинного обучения при оценке надёжности электроэнергетических систем методом Монте-Карло / Бояркин Д.А., Крупенев Д.С., Якубовский Д.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2018. – Т.11. – №4. – С.146-153. DOI: 10.14529/mmp180411.
2. Бояркин Д.А. Формирование случайных состояний электроэнергетических систем при оценке их надежности методом статистических испытаний / Бояркин Д.А., Крупенёв Д.С., Якубовский Д.В. // «Надежность и безопасность энергетики». – г. Москва. – 2017. – №1. – С.33-41.

В ведущих рецензируемых научных изданиях, индексируемых базами данных Web of Science, Scopus (включительно Q1 и Q2):

1. Iakubovskii, D. A model for power shortage minimization in electric power systems given constraints on controlled sections / Iakubovskii, D., Krupenev, D.,

Komendantova, N., Boyarkin, D. // Energy Reports, – 2021. – 7. – P. 4577–4586. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.07.022. (Web of Science Q1, Scopus Q1)

2. Iakubovskii D. Determination of an effective implementation of the differential evolution method to power shortage minimization / Iakubovskii, D., Krupenev, D., Komendantova, N., Boyarkin, D. // Proceedings of the ISSE 2021 - 7th IEEE International Symposium on Systems Engineering. – 2021. DOI: 10.1109/ISSE51541.2021.9582487

3. Boyarkin, D. Method for solving the problem of adequacy optimization of energy power systems based on simulated annealing / Boyarkin, D., Krupenev, D., Iakubovskii, D. // Proceedings of the ISSE 2021 - 7th IEEE International Symposium on Systems Engineering. – 2021. DOI: 10.1109/ISSE51541.2021.9582532.

4. Krupenev D. Improvement in the computational efficiency of a technique for assessing the reliability of electric power systems based on the Monte Carlo method / Krupenev D., Boyarkin D., Iakubovskii D. // Reliability Engineering & System Safety. – 2020. – Vol. 204, DOI: 10.1016/j.ress.2020.107171. (Web of Science Q1, Scopus Q1)

5. Krupenev D. Reserves of Generating Capacity for Perspective Planning of Development of the Unified Energy System of Russia / Krupenev D., Boyarkin D., Iakubovskii D., Kovalev G. and Lebedeva L. // E3S Web Conferences, – 2020. – 209. – 06015, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020906015>

6. Iakubovskii D. Analysis power shortage minimization methods in the modern processing software for adequacy assessment of electric power systems / Iakubovskii D., Krupenev D. // E3S Web of Conferences. – 2020. – 209. – 06008. DOI: 10.1051/e3sconf/202020906008

7. Krupenev D. Research of the influence of power engineering equipment accident rate on the indicators of adequacy and the value of operating reserve of electrical power system / Krupenev D., Boyarkin D., Yakubovskii D. and Severina Y. // E3S Web of Conferences, – 2020. – 216. – 01010. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601010>

8. Krupenev, D. Research of mathematical models for minimizing power shortage with quadratic losses in power lines and with using network / Krupenev, D., Boyarkin, D., Iakubovskii, D. // E3S Web of Conferences., – 2020. – 216. – 01009. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601009>.

9. Krupenev D. Factoring in scheduled repairs of generating units when assessing the resource adequacy of electric power systems / Krupenev D., Iakubovskii D., Boyarkin D. // E3S Web of Conferences. – 2019, – 139, – 01018. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901018.

10. Boyarkin D. Multi-output regression in electric power systems adequacy assessment using monte-carlo method / Boyarkin D., Krupenev D., Iakubovskii D. // Proceedings of the SIBIRCON 2019 - International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. – Novosibirsk. – 2019. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958279.

11. Boyarkin D. Prediction of the power shortage in the electric power system by means of regression analysis by machine learning methods / Boyarkin D., Krupenev D., Iakubovskii D. / Proceedings of the 2019 International conference of young scientists on

energy systems research, ESR 2019. – Irkutsk, – 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201911403003.

12. Iakubovskii D. Application the differential evolution for solving the problem of minimizing the power shortage of electric power systems / Iakubovskii D., Boyarkin D., Krupenev D., // Proceedings of the 2019 International conference of young scientists on energy systems research, Irkutsk. – 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201911403002.

13. Iakubovskii D. Impacts of Earthquakes on Energy Security in the Eurasian Economic Union: Resilience of the Electricity Transmission Networks in Russia, Kazakhstan, and Kyrgyzstan. / Iakubovskii D., Komendantova N., Rovenskaya E., Krupenev D., Boyarkin D. // Geosciences (Switzerland). – 2019. – Vol.9. – №1. ID: 54. DOI:10.3390/geosciences9010054. (Web of Science Q2, Scopus Q2)

14. Boyarkin D., Machine learning in electric power systems adequacy assessment using Monte-Carlo method / Boyarkin D., Krupenev D., Iakubovskiy D., Sidorov D. // Proceedings of the 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Novosibirsk. – 2017.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных:

1. Крупенев Д.С., Якубовский Д.В., Бояркин Д.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017614029 от 05.04.2017, Программно-вычислительный комплекс «Надёжность».

2. Крупенев Д.С., Якубовский Д.В., Бояркин Д.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017620403 от 07.04.2017, База данных схем электроэнергетических систем для программно-вычислительного комплекса «Надёжность».

3. Якубовский Д.В., Крупенев Д.С., Бояркин Д.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662426 от 24.09.2019, Библиотека пакетной оптимизации.

4. Бояркин Д.А., Якубовский Д.В., Крупенев Д.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662459 от 25.09.2019, Обработка ретроспективных данных о ремонтах энергетического оборудования.

5. Крупенев Д.С., Якубовский Д.В., Бояркин Д.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019662460 от 25.09.2019, Программный комплекс формирования графиков нагрузки.

Отпечатано в типографии «ДубльПринт»
664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14, оф. 112
Заказ № 3497, тираж 120 экз.