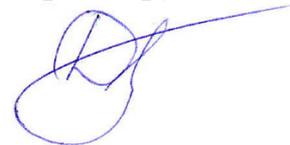


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения
Российской академии наук

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

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
Крупенёв Дмитрий Сергеевич

Иркутск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	2
Введение.....	6
Глава 1. Характеристика методики оценки балансовой надёжности ЭЭС, модели и методы минимизации дефицита мощности	15
1.1. Характеристика проблемы обеспечения балансовой надёжности ЭЭС	15
1.2. Характеристика методики оценки балансовой надёжности ЭЭС на основе метода статистических испытаний	17
1.3. Обзор отечественных и зарубежных программных средств оценки балансиной надёжности и краткая характеристика моделей минимизации дефицита мощности	21
1.3.1. Программные средства, используемые за рубежом.....	21
1.3.2. Отечественные программные средства	27
1.4. Обзор методов, применяемых при минимизации дефицита мощности ЭЭС в существующих программных комплексах.....	32
1.5. Обзор методик и инструментов параллельных вычислений.....	38
1.6. Выводы по главе.....	42
Глава 2. Развитие моделей и методов минимизации дефицита мощности...	45
2.1. Характеристика модели минимизации дефицита мощности	45
2.2. Постановки задач математических моделей минимизации дефицита мощности	46
2.2.1. Линейная модель без потерь при перетоках мощности.....	46
2.2.2. Линейная модель с потерями при передаче мощности	48
2.2.3. Линейная модель с матрицей сетевых коэффициентов.....	50

2.2.4. Нелинейная модель с квадратичными потерями при передаче мощности	51
2.2.5. Нелинейная модель с квадратичными потерями при перетоках мощности с меньшим числом переменных	51
2.3. Модификации моделей минимизации дефицита мощности	53
2.3.1. Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями, устранение встречных перетоков мощности.....	53
2.3.2. Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями, двухэтапная оптимизация, оптимальное потокораспределение	54
2.3.3. Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями (учет контролируемых сечений).....	55
2.3.4. Вариант модификации нелинейной модели с квадратичными потерями и меньшим числом переменных, с учетом контролируемых сечений.....	57
2.3.5. Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями и матрицей сетевых коэффициентов	58
2.4. Характеристика методов минимизации дефицита мощности.....	59
2.4.1. Метод штрафных функций для задачи минимизации дефицита мощности	61
2.4.2. Применение группы градиентных методов к задаче минимизации дефицита мощности	64
2.4.3. Применение группы методов дифференциальной эволюции к задаче минимизации дефицита мощности.....	71
2.4.4. Модификации внутренних блоков методов дифференциальной эволюции	82
2.5. Выводы по главе.....	84

Глава 3. Разработка комплекса программ для оценки балансовой надежности ЭЭС	87
3.1. Общая концепция комплекса программ для оценки балансовой надежности ЭЭС.....	87
3.2. Программная реализация динамической библиотеки блока оптимизации	91
3.2.1. Структура строения связанных и наследуемых классов динамической библиотеки блока оптимизации	96
3.2.2. Программная реализация предлагаемых моделей МДМ.....	98
3.2.3. Программная реализация предлагаемых методов оптимизации.....	100
3.2.4. Программная реализация технологий распараллеливания для метода Дифференциальной Эволюции	103
3.3. Выводы по главе.....	105
Глава 4. Экспериментальные исследования модифицированных моделей и методов минимизации дефицита мощности.....	108
4.1. Тестовые схемы для проведения численных экспериментов работоспособности библиотеки блока оптимизации	108
4.2. Численные эксперименты определения минимумов дефицита мощности для моделей МДМ градиентными методами.....	112
4.3. Численные эксперименты определения минимумов дефицита мощности для моделей МДМ методами дифференциальной эволюции	119
4.4. Анализ численных экспериментов применения методов минимизации дефицита мощности.....	129
4.5. Выводы по главе.....	131
Заключение	133

Список сокращений и условных обозначений.....	138
Список литературы	139
Приложение А. Свидетельства о регистрации программ ЭВМ.....	150
Приложение Б. Акт о внедрении	155

ВВЕДЕНИЕ

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 надёжности 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 библиотеке блока оптимизации, интегрируемой в программный комплекс для оценки балансовой надёжности ЭЭС.

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, И.М. Маркович, 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, 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 потоков 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 блока 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 и ценность работы работы

Разработанные математические модели, численные методы и их модификации были программно реализованы в виде динамической программной библиотеки пакетной оптимизации, входящей в состав программного комплекса «Надежность». 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 перетоков 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 перетоков 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

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, PASA, 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 в том числе [36-56], из которых 2 в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.13.18 (технические науки) [44], [47], 14 – в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus (2 статьи в журналах Q1 [36], [37], 1 статья в журнале Q2 [38]), 5 – свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных [52-56].

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.

ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЭС, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ ДЕФИЦИТА МОЩНОСТИ

1.1. Характеристика проблемы обеспечения балансовой надёжности ЭЭС

Балансовая надёжность ЭЭС определяется как способность ЭЭС поставлять электроэнергию потребителям в нужном объеме и требуемого качества в определенный момент времени с учетом незапланированных перерывов в работе, плановых и внеплановых отключений ее элементов, а также различных ограничений и воздействий на поставку энергоресурсов [1, 2]. Она также характеризует достаточность генерирующих мощностей в ЭЭС с учетом пропускных способностей сетей их взаимного резервирования и обеспеченности энергоресурсами.

Балансовая надёжность играет важную роль при планировании развития ЭЭС, включающая в себя задачу анализа балансов мощности и электроэнергии, основными целями которой является:

- оценка соответствия намеченного на перспективу развития генерирующих мощностей и электрических сетей требованиям обеспечения потребителей электроэнергией с заданной степенью надёжности;
- определение потребности в новых генерирующих мощностях с учётом перспективной динамики спроса на электрическую энергию и мощность в ЭЭС, планируемых объёмов реконструкции и демонтажа оборудования, использования мощностей действующих электростанций, экспортных поставок электроэнергии.

По классификации нарушений электроснабжения потребителей ЭЭС, которая приводится в [3], БН является надёжностью ЭЭС верхнего иерархического уровня – надёжностью основной структуры ЭЭС. Балансовая надёжность характеризует вероятность появления нарушений электроснабжения потребителей вследствие возникновения дефицита мощности в ЭЭС, связанного с недостаточной рабочей мощностью электростанций или недостаточной пропускной способностью

электрических связей для передачи мощности между отдельными частями ЭЭС в целях обеспечения спроса на мощность и взаимного резервирования электростанций. Основными причинами таких нарушений могут являться отказы генерирующего оборудования или элементов основной (системообразующей) электрической сети. Нарушения электроснабжения, вызванные отказами элементов распределительных сетей и систем электроснабжения, осуществляющих передачу мощности конкретным потребителям не рассматриваются в процессе анализа балансовой надежности ЭЭС, поскольку причины данных нарушений не связаны с дефицитом мощности в системе в целом. При расчёте балансовой надежности также не рассчитывается устойчивость переходных и установившихся послеаварийных режимов при аварийном отключении элементов ЭЭС, что является самостоятельной сложной задачей и рассчитывается отдельно. Условия устойчивости данных режимов должны быть учтены при определении пропускной способности системообразующей сети. Целью анализа балансовой надежности ЭЭС является расчёт показателей балансовой надёжности (ПБН) ЭЭС с последующим определением оптимальной структуры основных генерирующих мощностей и электрических связей, а также обеспеченностью резервом генерирующих мощностей ЭЭС.

В качестве понятия балансовой надежности в зарубежной литературе используется словосочетание «adequacy» [4-6] (пер. адекватность/достаточность), что может быть трактовано как достаточное количество генерирующих мощностей и необходимый уровень пропускных способностей связей для надёжной поставки электроэнергии потребителям.

Из вышеизложенного можно заключить, что в данной работе под понятием балансовой надежности, а также adequacy, рассматривается и понимается оценка соответствия (достаточности) уровня генерирующих мощностей и пропускных способностей связей конкретной ЭЭС со спросом на электроэнергию и мощность со стороны потребителей данной ЭЭС.

1.2. Характеристика методики оценки балансовой надёжности ЭЭС на основе метода статистических испытаний

Принимая во внимание то, что оценка балансовой надёжности проводится путём расчёта и последующего анализа показателей балансовой надёжности, необходимо уточнить, что в основе данной процедуры расчёта лежит метод статистических испытаний, который также известен в литературе, как метод Монте-Карло [1], [4], [8-14]. Данный метод основан на формировании набора псевдослучайных реализаций динамики изменения состояний системы. Каждая псевдослучайная реализация формируется в процессе хронологического моделирования смены состояний элементов системы в течение расчетного периода с учетом влияния плановых и неплановых ремонтов, ограничений различного рода и других факторов. Переходы между возможными состояниями элементов системы моделируются псевдослучайным образом в соответствии с вероятностными характеристиками, как для каждого элемента системы, так и для совокупности таких элементов. Предполагается, что происходящие в соседние моменты времени случайные события статистически независимы. Такой подход позволяет существенно экономить время расчёта и вычислительные ресурсы благодаря меньшему, по сравнению с полным перебором, числу псевдослучайных реализаций системы, при достаточном уровне точности.

По мере формирования отдельных псевдослучайных реализаций динамики изменения системы путем имитационного моделирования из них выделяются события с разным уровнем дефицита мощности, а также рассчитывается набор вероятностных показателей системы, соответствующих таким событиям.

Основой для расчётов дефицитов мощности является имитационное моделирование ЭЭС, куда входит математическая модель ЭЭС, а также методы оптимизации, позволяющие получать значение дефицита мощности для каждого из рассматриваемых состояний системы. Качество результатов, в том числе скорость и точность расчёта, возможность решения задач с растущим числом оптимизируемых параметров, зависит от применяемого метода оптимизации и

правильности математической модели. Составляющие вероятностных показателей системы для каждой реализации, соответствующей дефициту мощности, запоминаются и накапливаются. Специальный блок процедуры расчета проводит статистическую обработку характеристик системы в состоянии дефицита мощности. По результатам статистической обработки определяются показатели балансовой надежности и другие характеристики, которые могут представлять интерес.

Таким образом, задача оценки балансовой надежности ЭЭС формулируется следующим образом: *для заданных почасовых графиков потребления мощности по зонам надежности, состава, технических и надежности параметров генерирующего оборудования в зонах надежности, состава, технических и надежности параметров линий электропередачи в межзонных связях необходимо определить показатели балансовой надежности для зон надежности (ЗН) за рассматриваемый период (обычно период оценки равен году) [12-13].*

Для достижения адекватных и достоверных результатов расчета, при вычислении ПБН ЭЭС следует учитывать следующие составляющие:

- плановые и неплановые (аварийные) ремонты генерирующего оборудования;
- неплановые ремонты линий электропередачи в межзонных связях;
- ограничения располагаемой мощности генерирующего оборудования, в том числе сезонного характера;
- нерегулярные отклонения и регулярные (суточные, сезонные) изменения потребления мощности в зонах надежности.

К числу ПБН относят: вероятность бездефицитной работы; математическое ожидание (м.о.) дефицита мощности; м.о. недоотпуска электроэнергии как в зонах надёжности (ЗН) – элементов расчетной модели ЭЭС, представляющий собой часть ЭЭС с набором генерирующих агрегатов и нагрузкой, ограничения по пропускной способности линий электропередачи внутри которой отсутствуют, так и системы в целом; вероятностно взвешенные двойственные оценки достаточности

генерирующих мощностей и сетевой инфраструктуры. В международной практике используются близкие по смыслу ПБН, такие как: ожидаемая величина недопоставленной энергии (Expected Unserved Energy, EUE); вероятность возникновения дефицита мощности (Loss of Load Probability, LOLP); среднее число дней дефицита мощности (Loss of Load Expectation, LOLE); среднее число часов дефицита мощности (Loss of Load Hours, LOLH).

Надежность сложных ЭЭС с учётом физико-технических свойств оценивается согласно следующим исходным соображениям. Рассматриваемая здесь балансовая надежность ЭЭС как степень обеспеченности электроснабжения потребителей характеризуется частотой, длительностью и глубиной возможных дефицитов мощности в системе. Определяя надежность электроснабжения относительно шин узловых подстанций, питающих нагрузку, режимы работы потребителей принимаются как внешний фактор, заданный соответствующими графиками эквивалентной нагрузки. Состояния самой ЭЭС в этом случае достаточно полно можно определить по графикам электропотребления, энергетическим параметрам и показателям надежности работы ее основного оборудования.

Таким образом, методика оценки балансовой надёжности ЭЭС на основании метода Монте-Карло включает в себя несколько блоков:

- 1) Подготовительный блок, направлен на сбор, актуализацию и систематизацию объема данных о системе, где проводится определение основных характеристик элементов системы в том числе генерирующего оборудования и линий электропередачи их агрегация в зоны надёжности, связи и контролируемые сечения. В том числе проводится определение вероятностей безотказной работы элементов, графики их ремонтов, графики нагрузки разных временных периодов.

- 2) Вероятностный блок, в котором проводится формирование состояний ЭЭС на расчетный период, где методом Монте-Карло с учетом равномерного распределения формируются состояния системы где случайным образом выбираются исключаемые из работы элементы. Происходящие в соседние моменты времени случайные события могут быть как зависимыми, так и

независимыми. Также к каждому сформированному состоянию дополнительно применяется график ремонтов, где дополнительные элементы могут быть выведены из эксплуатации на определенный период.

3) Блок оптимизации сформированных состояний предназначен для расчета дефицита мощности в системе. Каждое состояние ЭЭС сформированное в предыдущем блоке обрабатывается и представляется в соответствии с математической моделью, после чего осуществляется минимизация дефицита мощности (МДМ).

4) В блоке вычисления показателей балансовой надежности ЭЭС обрабатывается вся накопленная информация о дефицитах в зоне надёжности и загрузке элементов ЭЭС (результаты работы первых двух блоков) после чего вычисляются показатели балансовой надёжности и другие характеристики, которые представляют интерес для дальнейшего анализа.

Основными компонентами третьего блока являются математические модели минимизации дефицита мощности и методы оптимизации. Идея заключается в формировании задачи, основываясь на модели минимизации дефицита мощности с использованием данных полученных из второго блока – конкретных случайных состояний системы с последующей оптимизацией, т.е. поиском минимума дефицита мощности. В математических моделях в качестве параметров должны быть обозначены генераторные мощности и нагрузки всех зон надёжности/узлов, пропускные способности связей, информацию о потерях на перетоках мощности. В общем виде решается задача распределения мощности по всей системе для конкретного состояния таким образом, чтобы достичь минимума дефицита мощности, обеспечить максимум покрытой нагрузки с учетом балансов мощности в зонах надёжности/узлах и адекватным, физически корректным потокораспределением.

1.3. Обзор отечественных и зарубежных программных средств оценки балансовой надежности и краткая характеристика моделей минимизации дефицита мощности

1.3.1. Программные средства, используемые за рубежом

На сегодняшний день известен ряд зарубежных программных комплексов, предназначенных для решения задачи оценки балансовой надежности ЭЭС [15]. Практически во всех программных комплексах используется одинаковая методика оценки БН, но имеются различия в деталях её реализации. Следует также учесть, что зарубежные комплексы рассматривают разные задачи в том числе минимизацию дефицита мощности, расчет затрат и другие.

Программный комплекс **ANTARES** [16-19], разработки RTE (French Electricity Transmission system Operator) включает в себя решение линейной модели МДМ, которая учитывает множество различных параметров, а для работы с ЭЭС используется неориентированный граф. Целевая функция направлена на минимизацию суммы затрат различных видов мощности. Балансовые ограничения этой модели основаны на первом законе Кирхгофа, где учитываются: нагрузка потребителей, генерация мощности и потоки мощности. Рассматриваемая модель включает и экономическую составляющую, т.е. при определении дефицита мощности учитываются затраты на производство мощности и её передачу.

Программный комплекс **Transmission Reliability Evaluation of Large-Scale Systems (TRELSS)**, разработки Electric Power Research Institute (EPRI). Использует одноименную модель, которая в настоящее время полностью перенесена в программный комплекс **Transmission Contingency Analysis Reliability Evaluation (TransCARE)** [15], [20-22], основой которого является моделирование с помощью Марковских процессов, применяются линейные модели транспортной сети, а вычисление показателей надежности происходит несколькими разными способами. Один из них основан на мерах, ориентированных исключительно на системные проблемы компонентов сети, такие как перегрузка, нарушения или

отклонения напряжения и разделение сети. Этот подход называется «подходом к системным проблемам» и обеспечивает информацию по показателям частоты, продолжительности и серьезности системных проблем. Стоит обратить внимание, что этот подход не учитывает возможность исправления проблем с помощью реакции системы и / или действий оператора. Следовательно, этот подход дает пессимистический взгляд на надежность и является индикатором наихудшего сценария. Другой подход, названный «подход возможностей», предоставляет набор индикаторов отключения нагрузки в качестве показателя ненадежности ЭЭС. Целью данного подхода является оценка объема нагрузки, которую необходимо отключить, если проблемы в ЭЭС сохраняются даже после принятия корректирующих действий после отказа энергетического оборудования. Все используемые показатели надёжности, такие как ожидаемая неиспользованная энергия (EUE), вероятность, частота и продолжительность отключения нагрузки, вычисляются для каждого нагрузочного узла, а также для системы в целом. Подход не учитывает время отклика корректирующих действий.

Программный комплекс **Siemens PTI PSS/E TPLAN** [15-16], [23-26], разрабатываемый компанией Siemens использует динамические, линейные и нелинейные модели в том числе в виде дополнительных модулей, которые предоставляют возможность расчета нескольких целевых функций, например, минимизация затрат на топливо, минимизация потерь активной мощности, минимизация потерь реактивной мощности, минимизация или максимизация передачи активной мощности и др. В рамках балансовой надежности расчеты производятся в соответствии с критериями N-1; N-2; N-1-1. Не смотря на то что программное обеспечение является закрытым и отсутствует возможность полноценного знакомства с моделями как, например, в программном комплексе Antares или TRELIS, существующие брошюры и методические материалы раскрывают содержание некоторых моделей. Также в комплексе предусмотрена возможность самостоятельно комбинировать вышеописанные цели в пользовательском режиме.

Программный комплекс **CORAL** [15-16], [27] разработки PSR, включает в себя такие модели как SDDP, OPTGEN/NETPLAN, последняя отвечает за расчеты, связанные с планированием расширения производства/передачи с ограничениями надежности поставок. За моделирование работы системы отвечает надстройка Coral, используются линеаризованные модели, цель задается как максимум покрытия нагрузки – Expected Power Not Supplied (EPNS), т.е. как ожидаемый дефицит мощности, также в программном комплексе реализовано вероятностное моделирование работы (минимизация затрат или максимизация доходов) крупных электрических и газовых систем с подробным представлением сложных гидроэнергетических систем. Модель OptGen так же, как и модель Antares учитывает гидро- и теплоэнергетические агрегаты ЭЭС, в том числе эксплуатационные затраты этих агрегатов.

Программный комплекс **Grid Reliability and Adequacy Risk Evaluator (GRARE)** [28], разработки Italian Electrical and Technical Experimental Center (CESI) оценивает надежность и экономические эксплуатационные возможности с помощью метода Монте-Карло. Данный инструмент предназначен для анализа полной модели системы (линии, генераторы, трансформаторы и т.д.). Математическая модель, используется в линеаризованном виде, как и большинство вышеописанных комплексных моделей, учитывает эксплуатационные затраты для гидро- и тепло генерирующих агрегатов ЭЭС. Поддерживаются модели до 5000 узлов, для расчета перетоков мощности и оценки уровня напряжения по модели постоянного тока применяется алгоритм Зауэра (Sauer) [28], [58]. При моделировании учитывается удовлетворение спроса на энергию при минимальных затратах, максимизации доходов от производства энергии и оптимального потокораспределения с учетом пропускных способностей связей. Для решения задачи потокораспределения применяется метод основанный на пропускной способности сети Net Transfer Capacities (NTC) [59]. Уровень надежности ЭЭС определяется с помощью следующих показателей - ENS, LOLE, LOLP. Производство возобновляемых источников рассчитывается путем случайного

отбора, исходя из статистически обработанных данных по производительности этих станций.

Программный комплекс **PLEXOS** [29], разрабатываемый компанией Energy Exemplar, представляет собой сложный инструмент моделирования энергосистем. Он использует смешанные целочисленные методы оптимизации для определения минимальных затрат и решения задач диспетчеризации для удовлетворения спроса при соблюдении технико-экономических ограничений на генерирующих агрегатах. Расширенное смешанное целочисленное программирование является основным алгоритмом моделирования и оптимизации. Задачи удовлетворения спроса на энергию при минимальных затратах, максимизации доходов от производства энергии и оптимального потокораспределения формулируются в линейном виде (после линеаризации) с целочисленными переменными, раскрывающими состояние генератора в сети. PLEXOS, как и GridView, широко используемый программный комплекс для моделирования режимов ЭЭС. Возможность расчета балансовой надежности по методу Монте-Карло была добавлена недавно и информация о практическом использовании комплекса для расчетов балансовой надежности крайне ограничена.

Программный комплекс **Multi-Area Reliability Simulation (MARS)** [15], [30-32], разработки компании General Electric, в котором уровень надежности оцениваемой системы определяется по показателям – LOLE, LOEE, частота и длительность аварийных отключений, необходимость инициации процедур в экстренных ситуациях. Для решения поставленных задач используется линеаризованная транспортная модель, с помощью которой выполняется анализ потоков мощности, соединяющих энергозоны системы. Данный комплекс получил развитие в виде еще одной модели Multi-area Power System (MAPS) [30], предназначенной для решения задачи определения наименьших затрат, рассматриваемой и в других вышеупомянутых комплексах.

Программный комплекс **GridView** [33] разработан той же командой аналитиков, которая разрабатывала GE MARS и (согласно информации, полученной от его разработчиков) обладает всеми функциональными свойствами

GE MARS, а также предлагает ряд дополнительных возможностей, включая расчет по полной электрической сети. Основное функциональное назначение GridView – проведение расчетов по оптимальному выбору состава генерирующего оборудования и режимов. Расчеты балансовой надежности как функция были добавлены позже. Он построен на современной методике программирования и в отличие от GE MARS предлагает графический пользовательский интерфейс.

Программный комплекс **NARP** [15], разработки Electric Reliability Council of Texas (ERCOT) использует линейные модели и алгоритмические возможности, которые превосходят те, которыми обладает GE MARS, но, с другой стороны, мало, что известно о практическом применении этого программного обеспечения. GE MARS, GridView, PLEXOS, NARP и RTE Antares имеют хронологические алгоритмы моделирования по методу Монте-Карло.

Модель **MARELI** [15], разработки компании Venturx основана на алгоритмах свертки законов распределения. Программный комплекс MARELI не предлагает хронологическую методологию моделирования по методу Монте-Карло и имеет значительные ограничения по конфигурациям систем электропередачи, которые он может симулировать с помощью линейной модели.

Подавляющее большинство системных операторов при анализе балансовой надежности используют программные комплексы, основанные на вероятностном моделировании энергосистем. Большинство системных операторов в США пользуются комплексом GE MARS (системный оператор (СО) Среднего Запада, СО Нью-Йорка, СО Новой Англии и Онтарио), СО Юго-Западного пула использует комплекс GridView; СО Нью-Йорка также в ряде случаев пользуется GridView, две системы полагаются на свои собственные программные ресурсы, разрабатываемые внутри компании, Новая Зеландия применяет GEM. В прошлом СО Среднего Запада и СО Техаса (ERCOT) использовали программный комплекс MARELI. Австралия пользуется как собственным набором программ, так и полагается на привлечение консультантов. Предположительно Франция, Австрия, Венгрия, Германия, Сербия, Шотландия и Союз для Средиземноморья пользуются программными комплексами RTE Antares Simulator который является

программным обеспечением с открытым исходным кодом. Комиссия по регулированию энергетики штата Калифорния использует собственную модель SAM (Supply Adequacy Model). В литературе присутствует упоминание об использовании Системным оператором Калифорнии программных комплексов NARP и PLEXOS для расчетов балансовой надежности. Все вышеперечисленные системы, кроме RTE Antares, являются коммерчески доступными, закрытыми программными комплексами.

Таким образом можно насчитать более 10 различных зарубежных комплексов с помощью которых могут быть проведены расчеты и оценка балансовой надежности ЭЭС. Моделирование в таких комплексах проводится методом Монте-Карло, реже применяются собственные разработки и Марковские процессы. Наиболее часто в рамках таких комплексов используются линейные и линеаризованные модели минимизации дефицита мощности, а также минимизации затрат (чаще ставится как основная цель). Некоторые программные комплексы помимо линейных моделей используют основанные на них – нелинейные, усложненные модели, которые также применяются при расчетах.

Представленные зарубежные программные комплексы в большинстве своем являются закрытым программным обеспечением с платной лицензией и функциональностью, основанной на работе линейных моделей, что, в свою очередь, снижает точность расчетов, т.к. в [12], [82] 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. Также, используемые в некоторых комплексах модели на первый план ставят задачу минимизации затрат, вместо минимизации дефицита мощности, что существенно влияет на получаемые результаты и искажает результаты анализа балансовой надежности ЭЭС.

1.3.2. Отечественные программные средства

Большое разнообразие программных комплексов для оценки балансовой надежности на протяжении длительного периода пополнялось также и отечественными научными разработками. Начиная с 70-х годов XX столетия, в СССР появились модели оценки балансовой надежности ЭЭС, где рассматривается многозонная система, так, некоторые модели совершенствуются и развиваются по настоящее время. Известно, что на надежность влияют не только генерирующее оборудование, но и сетевая составляющая, и это нашло отражение в моделях. Такие модели были созданы в ведущих отечественных научных энергетических организациях, таких как Сибирский энергетический институт (СЭИ), в настоящее время Институт Систем Энергетики им. Л.А. Мелентьева сибирского отделения Российской Академии наук (ИСЭМ СО РАН), Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского (ЭНИН), Киргизский научно-исследовательский отдел энергетики (КирНИОЭ) и др.

В отечественных программных комплексах применяются как линейные модели потокораспределения, так и нелинейные. Из линейных можно обратить внимание на модель МДМ, представленную в [34]. Программный комплекс **ОРИОН-М** (Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук) включает в себя модель, где целевая функция направлена на минимизацию разности мощности спроса нагрузки и обеспечения потребности с учетом коэффициента, отражающего стоимостные показатели ограничений потребителей. В балансовых ограничениях учитывается разница обеспеченной потребности и используемой генерирующей мощности для каждой зоны надёжности, где также принимается в расчет сумма перетоков связанных с данной зоной, потери мощности не учитываются. При этом подобная линейная постановка имеет недостаток, заключающийся в возникающей неоднозначности в распределении дефицита мощности по отдельным зонам надёжности. Устранение неоднозначности требует второго этапа решения задачи минимизации системного дефицита мощности. Для второго этапа меняется целевая функция, стоимостной

коэффициент не применяется, балансовые ограничения не меняются. Значения переменных для различных по глубине дефицитов мощности разделенных частей объединения ЭЭС определяются по принципу пропорционального ограничения потребителей (принцип пропорциональности).

В [35] В.П. Обоскаловым (НИЦ “Надежность и ресурс больших систем и машин” Уральского отделения Российской академии наук) представлены несколько математических моделей, направленных на решение задач минимизации дефицита мощности и суммарных затрат. Рассматриваемые модели разработаны и используются вне программных комплексов, однако решают поставленные перед ними задачи в рамках экспериментов. В первую очередь рассматривается модель минимума суммарных по всем зонам электроэнергетической системы затрат, связанных с ограничением нагрузки, и затрат на производство электроэнергии. Эта модель характеризуется наличием ограничений на текущую величину нагрузки и генерации, мощности передаваемой в зону по электрической сети (сетевые инъекции), а также на перетоки мощности по межсистемным связям. Соблюдаемый баланс мощностей соответствует первому закону Кирхгофа и определяется условием равенства нулю суммы инъекций и потерь мощности. Потоки мощности пропорциональны инъекциям, что частично учитывает второй закон Кирхгофа, а также в модели используются диагональная матрица проводимостей. Воздействие варьируемых переменных – генерации и нагрузки в какой-либо отдельной зоне на суммарный баланс мощности в системе осуществляется через сетевые инъекции. Решение задачи оптимального распределения небаланса мощности узла между генерацией и ограничением нагрузки, которое можно рассматривать как дополнительную генерацию, не представляет каких-либо проблем и известно, как распределение по критерию равенства относительных приростов затрат на производство электроэнергии. Одним из вариантов решения данной задачи является квадратичное программирование, вследствие чего появляется необходимость в линейной форме представления всех ограничений, таким образом формулируется линейная задача. Также рассматривается вариант данной модели с

учетом затрат на генерацию, что говорит о возможности регулировки учета экономических показателей при расчетах.

В качестве направления развития линейной модели оптимального распределения дефицита мощности применяются сетевые инъекции в виде управляющих переменных, при этом реализуется критерий минимума суммарных эксплуатационных затрат, таким образом, целевая функция принимает вид квадратичной формы. В том числе рассматривается вариант линейной модели с учетом пропорциональности вынужденных ограничений нагрузки и генерации, где учитывается критерий оптимальности распределения дефицита мощности пропорционально нагрузкам. Данная модель представлена с учетом критерия минимума суммы квадратов отклонений от единого для всех зон идеального коэффициента, полученного без учета сетевых ограничений, таким образом, задача сформулирована как нелинейная. Еще один вариант развития модели – применение критерия минимального отклонения от идеальных значений, что в конечном итоге позволяет использовать в качестве целевой функции сумму взвешенных квадратов невязок.

Несмотря на вариативность представленных моделей, целью данных моделей 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 надежности.

В ИСЭМ СО РАН на протяжении длительного времени разрабатываются программные комплексы оценки балансовой надёжности, это такие ПК, как «ПОТОК-3», «КОРАЛЛ» и «ЯНТАРЬ» [10], [12-14] которые включают в себя оригинальные математические модели, направленные на выявление минимума дефицита мощности.

Программный комплекс **ПОТОК-3** (ИСЭМ СО РАН), являясь развитием модели ПК ПОТОК, базируется на методе последовательных статистических испытаний. Достоинством одноименной модели является использование хронологического принципа моделирования, который позволяет учитывать

возможности влияния предшествующего состояния на последующее. В программе расчёта дефицита мощности учитывается первый закон Кирхгофа. Для оценки минимального дефицита мощности в системе используются две подмодели. Первая – использует балансовые уравнения и основана на потоковых алгоритмах, а проблема неоднозначности при этом решается с помощью специальной задачи. Вторая подмодель основана на уравнениях сети в идеализации по постоянному току и для ее решения применяется оптимизационный метод внутренних точек в совокупности с методом релаксации.

Программный комплекс **КОРАЛЛ** (ИСЭМ СО РАН) направлен на решение задачи оценки балансовой надежности, включает в себя двухэтапную модель минимизации дефицита мощности. На первом этапе решения оптимизационной задачи определяется и минимизируется суммарный дефицит по системе в целом – решается задача линейного программирования с линейными ограничениями.

На втором этапе осуществляется перераспределение полученных дефицитов (если позволяют пропускные способности ЛЭП) пропорционально нагрузкам по всем узлам при условии, что найденная величина минимального суммарного дефицита в системе не изменится – решается нелинейная (квадратичная) задача с ограничениями. Решение проводится методом внутренних точек.

Программный комплекс **ЯНТАРЬ** (ИСЭМ СО РАН) базируется на базе ПК КОРАЛЛ и является его продолжением, включает в себе лучшие решения, реализованные в предыдущем комплексе, предназначен для оценки надежности в смысле безотказности и ремонтпригодности (восстанавливаемости) больших сложных ЭЭС, представляемых любой (радиальной, кольцевой) многозонной расчётной схемой с ограниченными пропускными способностями связей между узлами. Задача решается в условиях управления развитием и долгосрочного планирования функционирования на уровнях Единой, объединённых и районных ЭЭС. Формирование расчётных состояний осуществляется методом статистических испытаний на основе аналитически полученных функций распределения состояния генерирующей мощности, линий электропередачи по связям и нагрузок с учётом их случайных колебаний в узлах. Ряды распределения

состояния оборудования системы и характерные суточные графики нагрузок являются исходной информацией для формирования расчётных состояний системы. Минимизация дефицита мощности проводится с учетом потерь в сетях методом внутренних точек в квадратичной постановке.

Несмотря на корректные постановки математических моделей и расчет минимизации дефицита мощности без учета затрат и экономических показателей, ранее разрабатываемые в ИСЭМ СО РАН комплексы не соответствуют текущим требованиям к моделям, а именно, существует проблема двойственных перетоков мощности на одной связи, а также не учитываются контролируемые сечения с заданной характеристикой максимально допустимого перетока.

Программный комплекс «Надежность» [36 - 56] является развитием программного комплекса ЯНТАРЬ и в настоящее время разрабатывается в ИСЭМ СО РАН с применением результатов научно-исследовательской работы при участии автора. Комплекс предназначен для оценки балансовой надежности ЭЭС разной сложности и размерности, включает в себя несколько моделей МДМ, в том числе линейную и несколько нелинейных. Целевая функция обозначена как минимум дефицита мощности, а балансовые ограничения включают в себя разницу мощности в самой зоне, а также входящий и исходящий перетоки мощности с линейными и квадратичными потерями. В том числе для распределения дефицита по всем потенциально дефицитным зонам надежности примерно пропорционально нагрузкам этих зон надежности был внедрен второй этап оптимизации по другой целевой функции. Таким образом, дополнительно может быть использована двухэтапная модель, которая в последствии получила две модифицированные целевые функции. Также в программном комплексе может быть использована модель, учитывающая особенности работы ЭЭС в условиях оптового рынка. Помимо этого, в комплексе реализованы расчеты с помощью моделей, учитывающих матрицы сетевых коэффициентов для учета сетевых ограничений использующие МДП контролируемых сечений (КС).

1.4. Обзор методов, применяемых при минимизации дефицита мощности ЭЭС в существующих программных комплексах

Ранее рассмотренные программные продукты, предназначенные непосредственно для решения задачи оценки балансовой надежности, помимо разных математических моделей и подходов, реализуют в себе различные методы решения транспортных задач, задач распределения потоков мощности, минимизации дефицита мощности, а также методы линейного и нелинейного программирования.

В нескольких представленных программных комплексах, как зарубежных, так и отечественных, задача оценки балансовой надежности зачастую относится на второй план или является побочным приложением к решению другой проблемы - задачи потокораспределения. Известными и применяемыми методами для решения таких задач в представленных комплексах являются: метод Форда-Фалкерсона [13], [57], стохастический метод потокораспределения Зауэра (Generalized stochastic power flow algorithm Sauer) [28], [58], метод основанный на пропускной способности сети Net Transfer Capacities (NTC) [59], метод рыночных связей на основе потоков сети Flow-based market coupling (FBMC) [60], метод доступных пропускных способностей Available Transfer Capacities (ATC) [61].

Метод **Форда – Фалкерсона (FFA)** - это «жадный» алгоритм, который вычисляет максимальный поток в сети [57]. Иногда его называют «методом», а не «алгоритмом», поскольку подход к поиску дополнительных путей в остаточном графе не полностью определен или определен в нескольких реализациях с разным временем выполнения. Название «Форд – Фалкерсон» часто также используется для алгоритма Эдмондса – Карпа, который является полностью определенной реализацией метода Форда – Фалкерсона. Идея алгоритма заключается в следующем: пока существует путь от источника (начальный энергоузел) до приемника (конечный энергоузел) с доступной емкостью на всех ребрах пути, необходимо отправить поток по одному из путей. Изначально величине потока присваивается значение 0: $f(u, v) = 0$ для всех $u, v \in V$. Затем величина потока

итеративно увеличивается посредством поиска увеличивающего пути (путь от источника s к стоку t , вдоль которого можно послать большой поток). Процесс повторяется, пока можно найти увеличивающий путь.

На каждом шаге алгоритм добавляет поток увеличивающего пути к уже имеющемуся потоку. Если пропускные способности всех рёбер — целые числа, легко доказать по индукции, что и потоки через все рёбра всегда будут целыми. Следовательно, на каждом шаге алгоритм увеличивает поток по крайней мере на единицу, следовательно, он сойдётся не более чем за $O(f)$ шагов, где f — максимальный поток в графе. Можно выполнить каждый шаг за время $O(E)$, где E — число рёбер в графе, тогда общее время работы алгоритма ограничено $O(Ef)$.

Если величина пропускной способности хотя бы одного из рёбер — иррациональное число, то алгоритм может работать бесконечно, даже не обязательно сходясь к правильному решению.

Программные комплексы, в которых на первый план выходит задача оценки балансовой надёжности, зачастую снабжены самостоятельно реализованными численными методами линейной и нелинейной оптимизации, предназначенными для решения задачи минимизации дефицита мощности и/или затрат. Для решения линейных задач часто используют симплекс и двойственный симплекс метод, для нелинейных пользуются градиентными методами и методом внутренних точек.

Симплекс-метод является универсальным методом, которым можно решить любую задачу линейного программирования [62]. Его идея состоит в следующем. Используя систему ограничений, приведенную к общему виду, т.е. к системе m уравнений с n переменными ($m < n$), находят ее любое базисное решение, по возможности наиболее простое. Если первое же найденное базисное решение оказалось допустимым, то проверяют его на оптимальность. Если оно не оптимально, то переходят к другому допустимому базисному решению. Симплексный метод гарантирует, что при этом новом решении линейная форма, если не достигнет оптимума, то приблизится к нему (в случае перехода к вырожденному базисному решению значение линейной формы не изменится). С новым допустимым базисным решением поступают так же, пока не находят

решение, которое является оптимальным. Если первое найденное базисное решение окажется недопустимым, то с помощью симплексного метода осуществляют переход к другим базисным решениям, которые позволяют приблизиться к области допустимых решений, пока на каком-то шаге не получится допустимое базисное решение. К нему применяют тот же механизм.

Таким образом, применение симплексного метода разделяется на два этапа:

- 1) нахождение опорного решения системы ограничений;
- 2) нахождение оптимального решения.

При этом каждый этап включает несколько шагов, соответствующих тому или иному базисному решению. Так как число базисных решений всегда ограничено, то ограничено и число шагов симплекс-метода, однако возможно заикливание, в связи с чем используется «антициклин» для выбора очередного шага.

Двойственный симплекс-метод, как и симплекс-метод, используется при нахождении решения задачи линейного программирования, записанной в каноническом виде, для которой среди векторов $A_j (j = 1, 2, \dots, n)$ имеется m единичных. Вместе с тем двойственный симплекс-метод можно применять при решении задачи линейного программирования, свободные члены системы уравнений которой могут быть любыми числами (при решении задачи симплекс-методом в случае отрицательности хотя бы одного из этих чисел сначала ведется поиск опорного решения, после чего происходит переход к симплекс-таблице). При двойственном симплекс-методе сразу составляется симплекс-таблица. Если в столбце вектора A_0 имеются отрицательные числа, то выбирают наибольшее по абсолютной величине отрицательное число. В том случае, когда таких чисел несколько, берут какое-нибудь одно из них. Выбор этого числа определяет вектор, исключаемый из базиса. Например, это вектор A_l . Чтобы определить, какой вектор следует ввести в базис, находим

$$\min \left\{ -\frac{Z_j - C_j}{a_{lj}} \right\} \text{ в задаче на максимум и}$$

$$\max \left\{ -\frac{Z_j - C_j}{a_{lj}} \right\} \text{ в задаче на минимум,}$$

где $a_{lj} < 0$, Z – целевая функция, C_j – коэффициенты линейной функции, соответствующие векторам базиса, $Z_j - C_j$ – значения оценок.

Тем самым определяется разрешающий элемент, и переход к новому шагу симплекс-таблицы производится по обычным правилам симплексного метода. Итерационный процесс продолжают до тех пор, пока в столбце вектора A_0 не будет отрицательных чисел. Затем оптимальный план находят обычным симплексным методом. Если на некотором шаге окажется, что в i -й строке симплекс-таблицы в столбце вектора A_0 стоит отрицательное число, а среди остальных элементов этой строки нет отрицательных чисел, то исходная задача не имеет решения.

Метод внутренней точки, разработанный в ИСЭМ СО РАН И.И. Дикиным, позволяющий решать задачи выпуклой оптимизации с условиями, заданными в виде неравенств, сводя исходную задачу к задаче выпуклой оптимизации [63-67]. Более того, метод внутренней точки не ограничен только линейным программированием в отличие от симплекс-метода, и сейчас он является основным алгоритмом для задач нелинейной выпуклой оптимизации с ограничениями.

Согласно методам внутренней точки (иначе называемым методами барьерных функции), исходную для поиска точку можно выбирать только внутри допустимой области. Выбор начальной точки поиска осуществляется в зависимости от формулировки задачи. При отсутствии ограничений или их преобразовании к функциям штрафа с внешней точкой начальная точка выбирается произвольно. При наличии ограничений или их преобразовании к функциям штрафа с внутренней точкой начальная точка выбирается внутри допустимой области. При этом множество точек делится на допустимые и недопустимые в зависимости от ограничений. В свою очередь, множество допустимых точек в зависимости от ограничений также делится на граничные и внутренние.

Алгоритм метода внутренних точек можно представить следующей последовательностью действий. Исходя из решения вспомогательной задачи

находится начальное приближение x^0 , которое принадлежит множеству внутренних точек D_0 , и принимается как $x_r^0 = x^0$. (В случае, если точка $x^0 \in D_0$ известна, то этот этап опускается.) По формуле определяется начальное значение параметра штрафа $c_k = c_0$. (В общем случае значение $c_0 > 0$ может быть выбрано произвольным образом.)

Одним из методов оптимизации (обычно используется метод Ньютона) решается задача безусловной минимизации для фиксированного значения параметра штрафа c_r из начальной точки x_r^0 :

$$\min \Phi(x, c_r) = \min \left\{ Q(x) + c_r \sum \left(\frac{1}{g_i(x)} \right) \right\}, \quad (1.1)$$

где $Q(x)$ – целевая функция, $g_i(x)$ – функция ограничений неравенств, где $g_i(x) \geq 0$. Оптимальное решение этой задачи x_r^* принимается за начальную точку следующей итерации: $x_{r+1}^0 = x_r^*$. Далее проверяется условие окончания поиска оптимального решения x^* исходной задачи нелинейного программирования:

$$R(x_r^*, c_r) = |c_r \sum \left(\frac{1}{g_i(x)} \right)| < \delta, \quad (1.2)$$

Если условие выполняется, то процесс поиска оптимального решения x^* закончен и точка x_r^* принимается за приближенное решение исходной задачи. В противном случае изменяется значение параметра штрафа c_r таким образом, чтобы с ростом номера итерации r его значение уменьшалось, стремясь к нулю (например, можно считать, что $c_{r+1} = c_r / \beta$, где $\beta > 1$). Весь процесс поиска повторяется с начиная с решения задачи безусловной минимизации.

Недостатком рассмотренного алгоритма является то, что он требует существования «внутреннего множества» D_0 допустимой области D , т. е. он не позволяет решать задачи нелинейного программирования с ограничениями *типа равенств*. Кроме того, для использования этого алгоритма необходимо знать начальное приближение x^0 , в котором все ограничения удовлетворяются как строгие неравенства.

В связи с этим рассматривают штрафную функцию $\Phi(x, c_r)$, для которой не требуется знать $x^0 \in D_0$ и которая позволяет решать задачи нелинейного программирования с ограничениями типа равенств так же, как и с ограничениями типа неравенств.

Предполагается, что второе неравенство в условиях Куна—Таккера выполняется в ослабленном виде:

$$g_i(x) > -c_r, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (1.3)$$

Вводятся множители Лагранжа следующим образом:

$$u_i = - \min [0, g_i(x)]. \quad (1.4)$$

Тогда в точке минимума x^* из последнего равенства условий Куна—Таккера можно записать.

$$\nabla Q(x) + \sum \frac{\min[0, g_i(x)]}{c_r} \cdot \nabla g_i(x) = 0. \quad (1.5)$$

Полученное выражение означает, что точка x_r^* является локальным минимумом штрафной функции $\Phi(x, c_r)$ с квадратичным штрафом $R(x, c_r)$

Если точка x^0 находится вне допустимой области D , то движение осуществляется из недопустимой области в допустимую таким образом, чтобы минимизировать значение штрафа за выход точки x из области D . В допустимой области $\Phi(x, c_r) = Q(x)$, а вне области D значение $R(x, c_r)$ очень велико по сравнению с $Q(x)$.

Алгоритм внутренних точек, применявшийся в программном комплексе «ЯНТАРЬ», также содержал дополнительные подзадачи и настройки для оптимального решения задачи, включающие в себя вспомогательный поиск направления улучшения решения, а также вычисления направления корректировки, нахождение шага корректировки и критерий останова.

Стоит также отметить, что в некоторых зарубежных программных комплексах используются коммерческие лицензированные решатели для расчетов задач минимизации дефицита мощности. В частности, используются программные

библиотеки **GAMS** (General Algebraic Modeling System) – это система моделирования высокого уровня для математической оптимизации, предназначенная для решения задач линейной, нелинейной и смешанной целочисленной оптимизации, в том числе программные библиотеки **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio**. Преимущество данных решателей – гибкая настройка и возможность автоматических комбинаций решателей для разных задач и моделей, используемых в комплексах, а существенный минус – коммерческая составляющая решателя, необходимость приобретения лицензии и невозможность полноценного внедрения в разрабатываемые программные решения.

Таким образом, представленные методы решают линейные и нелинейные задачи оптимизации. Ввиду того, что использование линейных моделей приводит к менее точным результатам, использование в современных комплексах потоковых методов и методов решения линейных задач можно считать существенным недостатком, снижающим необходимый уровень точности оценки балансовой надежности. Использование «тяжелых» методов с необходимостью большого числа ресурсозатратных операций, в том числе, метода внутренних точек, который требует дополнительно использовать методы штрафных функций или линеаризации модели, также может привести к снижению уровня точности расчетов и неэффективного использования ресурсов. Обозначенные недостатки могут быть решены путем проведения научно-исследовательской работы и подбора существующих методов оптимизации, лишенных данных недостатков.

1.5. Обзор методик и инструментов параллельных вычислений

Большую роль для вычислений играет скорость расчетов, а текущее оборудование и программные реализации позволяют достигать её разными способами. Одним из способов ускорения вычислений является распараллеливание независимых или частично зависимых от данных участков вычислений [68-69]. Многопоточность (Multithreading) – свойство платформы (например, операционной системы, виртуальной машины и т. д.) или приложения, состоящее

в том, что процесс, порождённый в операционной системе, может состоять из нескольких потоков, выполняющихся «параллельно», то есть без предписанного порядка во времени. При выполнении некоторых задач такое разделение может обеспечить более эффективное использование ресурсов вычислительной машины.

Некоторые реализации программных комплексов используют разные схемы распараллеливания вычислений [15], [24-26], [30], [70-71], в первую очередь используется параллельная обработка сгенерированных состояний ЭЭС (в случае, если используется метод Монте-Карло). Так, оптимизация состояний происходит не последовательно, одно за другим, а параллельно – несколько состояний за один момент времени, это сокращает общее время расчетов в несколько раз. В идеальных условиях ускорение зачастую равно количеству доступных физических потоков, но зависимо от пропускной способности системы хранения и реализации. Также распараллеливание применяется к методам формирования самих состояний, где сразу несколько состояний одновременно формируются в нескольких потоках, данный способ имеет те же ограничения по количеству доступных физических потоков и пропускной способности системы хранения. Одним из самых сложных, но доступных объектов вычислений для распараллеливания являются методы оптимизации.

К сожалению, не ко всем методам оптимизации можно полноценно применить технологии распараллеливания, особенно это касается итерационных методов. Проблема параллельности таких методов заключается в зависимости следующего шага от предыдущего. В таких случаях возможно распараллеливание вычислений во время выполнения самой итерации, однако эффективность такого подхода очень мала, ввиду постоянных затрат времени на подготовку, упаковку и запуск потока в системе. Однако данные технологии распараллеливания эффективно применяются в случае однотипных циклических, но мало зависимых друг от друга вычислений в теле самой итерации.

Для реализации и внедрения параллельных вычислений, как для состояний, так и для методов оптимизации возможно применить одно из нескольких различных решений. В настоящее время наиболее распространены

вычислительные устройства параллельной архитектуры SMP-системы (Symmetric Multi-Processor), где несколько одинаковых процессоров или процессорных ядер имеют доступ к общей памяти. Эта категория систем представлена многочисленными технологиями: реализации стандартов языка C++ 11/17/20 (`std::Thread`) [72-73]; набор библиотек для C++ (Boost Thread) [74-76], открытый стандарт для распараллеливания программ на языке программирования C, C++ (OpenMP) [77], набор компиляторов и библиотек C++ и Fortran (Intel Parallel Composer)[78], библиотека параллельных шаблонов (Microsoft PPL - Parallel Primitives Library), кроссплатформенная библиотека шаблонов C++ (Intel TBB - Thread Building Blocks) и др. [68], [79].

Как правило в операционных системах уже имеются функции для работы с процессами и потоками, средства для взаимодействия процессов: сокет, каналы, очереди сообщений, файлы, разделяемая память, файлы и др. Однако взаимодействие процессов и потоков должно быть синхронизировано, для этого применяются стандартные механизмы – взаимное исключение (mutex), критическая секция (critical section), событие (event) и семафор (semaphore) [80-81]. Каждый из этих объектов реализует свой способ синхронизации. Представленные библиотеки шаблонов, наборы компиляторов и стандартов в большинстве своем имеют готовую, скрытую реализацию синхронизации потоков, так что пользователю необходимо произвести локальную настройку региона распараллеливаемых вычислений в программном коде. Такие надстройки сильно упрощают написание программного кода и в случае использования мульти-платформенных библиотек (например, OpenMP) повышают его переносимость в другие операционные системы. В остальных, нативных случаях требуется проводить анализ разделяемых ресурсов и определение необходимости применения тех или иных механизмов синхронизации. Нативный подход усложняет написание программного кода и зачастую снижает возможности по переносимости ввиду использования разных низкоуровневых системных вызовов в разных операционных системах, но в тоже время снижает расходы ресурсов связанных с использованием внешних надстроек.

Набор библиотек для работы с потоками (**Boost Thread**) является объемным кроссплатформенным решением, включает в себя низкоуровневые объекты потоков и механизмы синхронизации. За счет использования абстракций такой библиотеки повышается переносимость программного кода в различные операционные системы, однако повышается сложность разработки. Реализованный в библиотеках подход сильно коррелирует с текущими обновлениями стандарта C++17/20 (**std::Thread**) т.к. множество текущих обновлений стандарта включает в себя реализации из библиотек Boost. Несмотря на кроссплатформенность данного подхода, работа с потоками происходит на низком уровне, что может затруднить создание сложного многопоточного приложения.

Открытый стандарт параллельного программирования многопроцессорных систем **OpenMP** для систем с общей памятью существует в виде кроссплатформенных библиотек и доступен для большинства операционных систем. Основным отличием данного подхода от нативных библиотек являются более высокоуровневые абстракции OpenMP. Используются `#pragma` директивы компилятора, позволяющие более мягко внедряться в существующий программный код и управлять многопоточностью, её синхронизацией, разделяемыми ресурсами и т.д. Достоинством данного стандарта можно считать широкую применимость и распространенность, совместимость программ, созданных без поддержки OpenMP, упрощенную процедуру внедрения параллельных механизмов.

Intel Parallel Composer представляет собой довольно обширный набор компиляторов и библиотек C++ и Fortran для Microsoft Visual Studio и Eclipse, позволяющих упростить и ускорить разработку программ, использующих многоядерные процессоры. Является одним из четырех инструментов, входящих в состав набора Intel Parallel Studio. Поддерживает новую версию стандарта OpenMP 3.0, а разработка и настройка ведутся подобными методами с добавлением `#pragma` директив компилятора в программный код. Является закрытым коммерческим программным обеспечением.

Библиотеки Intel Thread Building Blocks (внедряется в Microsoft Visual Studio и Eclipse вместе с Intel Parallel Composer) и Microsoft Parallel Performance Library предоставляют обобщённые многопоточные контейнеры, алгоритмы, позволяют формулировать программу в терминах графа задач, автоматически преобразуемых библиотекой в потоки. Описание параллелизма ведётся на логическом уровне: описываются взаимосвязи, зависимости выполняемых задач. Вызываемые функции этих библиотек частично совместимы, при этом ТВВ является кроссплатформенной библиотекой с большей функциональностью по сравнению с PPL.

Предположительно некоторые из представленных технологий внедрены и активно используются в вышеописанных программных комплексах для оценки балансовой надёжности. Настройки многопоточности также имеют программные библиотеки GAMS и CPLEX, что указано в документации и информации по их настройке.

1.6. Выводы по главе

В первой главе были рассмотрены основные характеристики проблемы обеспечения балансовой надёжности ЭЭС и методики для ее оценки, где применяется поэтапное моделирование ЭЭС на основании метода Монте-Карло. Анализ существующих зарубежных и отечественных программных комплексов оценки балансовой надёжности позволил выявить ключевые преимущества и недостатки существующих подходов.

В результате обзора современных программных комплексов, предназначенных для оценки балансовой надёжности ЭЭС, были проанализированы математические модели минимизации дефицита мощности, используемые в них. Были проанализированы следующие зарубежные комплексы и модели минимизации дефицита мощности в них: ANTARES, Transmission Reliability Evaluation of Large-Scale Systems (TRELSS), Siemens PTI PSS/E TPLAN, CORAL, Grid Reliability and Adequacy Risk Evaluator (GRARE), PLEXOS, Multi-Area

Reliability Simulation (MARS), GridView, NARP, MARELI; а также отечественные ОРИОН-М, ПОТОК-3, ЯНТАРЬ, «Надежность», и группа математических моделей, которая не вошла в реализацию ни в одном программном комплексе. Существенным замечанием можно отметить расхождение моделей в конечных целях расчета, так часть из них предназначена для расчета минимизации дефицита мощности, другие же ориентируются на снижение затрат в дефицитных ситуациях.

Большое внимание уделено обзору методов оптимизации, которые применяются в современных комплексах для решения задачи минимизации дефицита мощности в ЭЭС, а также расчетов по другим целевым функциям в том числе с учетом затрат. На сегодняшний день существуют такие комплексы, как например, GRARE, где решение для линейризованных моделей достигается с помощью поточных методов, таких, как метод Зауэра. Подобные методы ранее применялись в отечественных программных комплексах, в том числе метод Форда-Фалкерсона использовался для расчетов в программном комплексе ПОТОК. В свою очередь, в других зарубежных и отечественных программных комплексах, для решения линейных задач используется группа симплекс методов, в том числе реализующая параллельные вычисления, а также линейные решатели, входящие в системы моделирования высокого уровня для математической оптимизации, такие, как GAMS и CPLEX. Развитие и усложнение моделей минимизации дефицита мощности привели к формированию нелинейных и линейризованных моделей, для решения которых в отечественных комплексах используются разные реализации метода внутренних точек, а в зарубежных комплексах так же используются нелинейные решатели, входящие в системы моделирования высокого уровня.

Большую роль в современных программных комплексах играет скорость расчетов, повышение которой возможно за счет модификации математических моделей и применения более эффективных с точки зрения время- и трудозатрат математических методов. Современные устройства расчетов имеют как физическую, так и программную возможность разделения задач и их решения с помощью разных техник распараллеливания. Помимо параллельных вычислений задачи минимизации дефицита мощности для каждого состояния, существует

возможность ускорения оптимизации с помощью методов, поддерживающих возможность их распараллеливания и синхронизации.

На основе анализа, проведенного в данной главе, были сделаны следующие основные выводы: рассмотренные зарубежные программные комплексы в большинстве своем являются закрытым программным обеспечением с платной лицензией и функциональностью, основанной на работе линейных моделей, что, в свою очередь, снижает точность расчетов; несмотря на вариативность представленных моделей, целью некоторых моделей 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 надежности; проанализированные методы оптимизации решают линейные и нелинейные задачи оптимизации; 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 балансовой надежности; использование ресурсозатратных методов с линеаризацией моделей также может привести к снижению уровня точности расчетов и неэффективного использования ресурсов.

На основании полученных выводов предлагается следующая постановка задачи исследования, необходимо: разработать комплекс математических моделей минимизации дефицита мощности в соответствии с адекватным, физически корректным распределением потоков мощности и потокораспределения, учитывающих дополнительные ограничения по контролируемым сечениям и матрицу сетевых коэффициентов; сравнить корректность работы и эффективность группы градиентных методов оптимизации и методов дифференциальной эволюции для минимизации дефицита мощности; разработать и реализовать динамически подключаемую библиотеку оптимизации, интегрируемую в программный комплекс для оценки балансовой надежности ЭЭС на основании метода Монте-Карло.

ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ МИНИМИЗАЦИИ ДЕФИЦИТА МОЩНОСТИ

2.1. Характеристика модели минимизации дефицита мощности

Основой для расчетов дефицитов мощности является имитационное моделирование ЭЭС, куда входят математические модели МДМ и методы их оптимизации, позволяющие получать значение дефицита мощности для каждого из рассматриваемых состояний системы. Развитие моделей минимизации дефицита мощности при оценке балансовой надёжности, и методов их решения происходило постепенно по мере осознания данной проблемы и развития математических и вычислительных технологий. На сегодняшний день разработан ряд моделей МДМ, которые отличаются учетом тех или иных особенностей функционирования ЭЭС и влияют на адекватность определения дефицита мощности, а также других показателей надёжности и сложностью представления энергосистемы.

Как отмечалось ранее, оценка балансовой надёжности, в основе которой лежит метод статистических испытаний включает в себя блок расчетов дефицитов мощности куда входит математическая модель ЭЭС, а также методы оптимизации, позволяющие получать значение дефицита мощности для каждого из рассматриваемых состояний системы. Выбор математической модели МДМ является нетривиальной задачей, а для получения качественных результатов необходимо использовать физически адекватную модель с малым количеством допущений. Основной целью модели МДМ является поиск минимума дефицита мощности в узлах (или зонах надёжности) по заданному критерию при условии обеспечения допустимого и реализуемого режима, с учетом корректного потокораспределения мощностей в сети.

2.2. Постановки задач математических моделей минимизации дефицита мощности

2.2.1. Линейная модель без потерь при перетоках мощности

Задача минимизации дефицита мощности для программного комплекса КОРАЛЛ [10], [13] решается в два этапа и формулируется следующим образом: *«Для известных значений работоспособных генераторных мощностей, требуемых уровней покрытия и коэффициентов важности нагрузок в узлах, а также заданных пропускных способностей связей, найти оптимальное значение дефицита мощности по системе в целом и оптимально распределить его по узлам пропорционально нагрузкам с учетом категоричности потребителей, выполнения ограничений на диапазоны возможных изменений генераторной мощности и нагрузки в узлах, перетоков по связям, а также выполнения балансов в узлах».*

Для решения данной задачи была разработана двухэтапная модель минимизации дефицита мощности. Определение минимального суммарного дефицита по системе в целом осуществляется на первом этапе, далее, на втором этапе, проводится перераспределение дефицита между подсистемами.

Характеристика задачи может быть описана следующим образом: расчетная схема ЭЭС задается в виде графа – M узлов и N связей между ними; для каждого узла задается располагаемая генераторная мощность и нагрузка \bar{x}_m (МВт) и \bar{y}_m (МВт) ($m = 1, \dots, M$) соответственно, а для каждой связи – ее максимально допустимые двухсторонние ограничения пропускных способностей \underline{z}_n (МВт) и \bar{z}_n (МВт) ($n = 1, \dots, N$), в общем случае различные для прямого и обратного направлений.

Обозначив дефицит мощности в m -м узле через y_m (МВт), избыток генераторной мощности через x_m (МВт) и поток мощности по n -й связи через z_n (МВт), задачу первого этапа запишем так: найти

$$\min_{y,x,z} \sum_{m=1}^M (f_m y_m), \quad (2.1)$$

где $y \in R^m$, f_m — коэффициент целевой функции, имеющий смысл ущерба (штрафа и т.п.) за дефицит мощности в m -м узле, при ограничениях:

$$\sum_{n=1}^N a_{mn} z_n - y_m + x_m = b_m, \quad m = 1, \dots, M, \quad (2.2)$$

$$0 \leq y_m \leq \bar{y}_m, \quad m = 1, \dots, M, \quad (2.3)$$

$$0 \leq x_m \leq \bar{x}_m, \quad m = 1, \dots, M, \quad (2.4)$$

$$\underline{z}_n \leq z_n \leq \bar{z}_n, \quad n = 1, \dots, N, \quad (2.5)$$

$$b_m = \bar{x}_m - \bar{y}_m, \quad m = 1, \dots, M, \quad (2.6)$$

где a_{mn} — элементы m -ой строки и n -го столбца матрицы связей, которые принимают значения:

$$a_{mn} = \begin{cases} -1, & \text{если узел } m \text{ является началом связи } n \\ 1, & \text{если узел } m \text{ является концом связи } n \\ 0, & \text{если узел } m \text{ не принадлежит связи } n \end{cases} \quad (2.7)$$

Ограничение (2.2) называется «балансовым уравнением» и отражает первый закон Кирхгофа. Представленная задача решается на первом этапе.

На втором этапе решения задачи осуществляется принцип пропорционального распределения суммарного дефицита мощности в системе между узлами с учетом ограничений по пропускным способностям связей. Совокупность дефицитов y_m^1 (МВт) ($m = 1, \dots, M$) по узлам, полученная на первом этапе, принимается за начальное приближение для метода внутренних точек, который также используется на втором этапе. Задача формулируется как задача квадратичного программирования. Найти

$$\min_{y,x,z} \sum_{m=1}^M (\tilde{y}_m - y_m)^2, \quad (2.8)$$

где $\tilde{y}_m = \gamma \bar{y}_m$, при ограничениях (2.2–2.5), здесь:

$$\gamma = \frac{\sum_{m=1}^M y_m^1}{\sum_{m=1}^M \bar{y}_m}, \quad (2.9)$$

здесь γ – удельная величина дефицита мощности в системе (кВт дефицита/кВт нагрузки).

Использование данной модели МДМ с последующим распределением полученной мощности пропорционально нагрузкам в узлах позволяет однозначно определять не только системные, но и поузловые показатели надежности, что, естественно, расширяет возможности и области применения вычислительных комплексов оценки надежности.

Следует отметить, что развитие вышеописанной модели изменением целевой функции, в предложенной ниже постановке, показало возможность улучшить результаты (обнаруживается более быстрая сходимость алгоритма):

$$\min_{y,x,z} \sum_{m=1}^M y_m^2 / \bar{y}_m, \quad (2.10)$$

при ограничениях (2.2), (2.4) и (2.5). Ограничения — неравенства (1.3) для y_m в явном виде не присутствуют (но учитываются автоматически в целевой функции).

2.2.2. Линейная модель с потерями при передаче мощности

Продолжением разработки математических моделей программного комплекса КОРАЛЛ является программный комплекс ЯНТАРЬ, где в ранее рассмотренную линейную модель (первый этап) были добавлены потери при передаче мощности, а также был убран второй этап оптимизации.

Таким образом, задача минимизации дефицита мощности представлялась в линейном виде и формулировалась следующим образом: *«Для известных значений работоспособных генераторных мощностей, требуемых уровней нагрузок потребителей, пропускных способностей связей ЭЭС и коэффициентов потерь мощности в связях ЭЭС необходимо определить оптимальное*

потокораспределение в ЭЭС» [10], [12-14]. В новой постановке отсутствует требование к пропорциональному распределению мощности между узлами в соответствии с категоричностью потребителей.

Математически, проблема формулируется следующим образом:

$$\min_{y,x,z} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i), \quad (2.11)$$

при соблюдении балансовых ограничений:

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n, \quad (2.12)$$

а также ограничений на оптимизируемые переменные:

$$0 \leq y_i \leq \bar{y}_i, i = 1, \dots, n, \quad (2.13)$$

$$0 \leq x_i \leq \bar{x}_i, i = 1, \dots, n, \quad (2.14)$$

$$0 \leq z_{ij} \leq \bar{z}_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j, \quad (2.15)$$

где: x_i - используемая мощность (МВт) в узле i , \bar{x}_i - располагаемая генерирующая мощность (МВт) в узле i , y_i - покрываемая в узле i нагрузка (МВт), \bar{y}_i - величина нагрузки в узле i (МВт), z_{ij} - поток мощности из узла i в узел j (МВт), \bar{z}_{ij} - пропускная способность ЛЭП между узлами i и j (МВт), z_{ji} - поток мощности из узла j в узел i (МВт), \bar{z}_{ji} - пропускная способность ЛЭП между узлами j и i (МВт) a_{ji} - заданные положительные коэффициенты удельных потерь мощности при ее передаче из узла j в узел i , $j \neq i$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$.

Коэффициенты удельных потерь мощности в ЛЭП при её передаче были определены в соответствии с [10], [12], [82] и рассчитываются следующим образом:

$$a_{ji} = \frac{r_{ji}}{U_{\text{НОМ}}^2 \cos^2 \varphi_{ji}}, j = 1, \dots, J, i = 1, \dots, I, i \neq j, \quad (2.16)$$

где: 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; $\cos \varphi_{ji}$ - усреднённый коэффициент мощности межзональных связей между зонами надёжности j и i (обычно принимается равным 0,9).

Рассмотренная модель (2.11) – (2.16) представляет собой транспортную задачу, которая сильно похожа на предыдущую модель, однако основная цель данной задачи – минимизация дефицита мощности. Для решения данной задачи оптимизации, ввиду ее относительной простоты, в основном используется симплекс-метод и двойственный симплекс-метод в их разных вариациях.

2.2.3. Линейная модель с матрицей сетевых коэффициентов

Еще одной постановкой задачи минимизации дефицита мощности при оценке балансовой надёжности является постановка с использованием линейной 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 [48]. 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 МДМ₃ с видоизмененными балансовыми ограничениями вида:

$$z_{ij} = \sum_{k=1}^K m_{ij,k} \cdot (x_k - y_k), \quad (2.17)$$

$$\sum_{i=1}^I x_i = \sum_{i=1}^I y_i, \quad (2.18)$$

где $m_{ij,k}$ – коэффициент распределения потока мощности из k -й зоны в балансирующую зону на связь между зонами i и j ЭЭС, определяемый расчетами установившихся электроэнергетических режимов. Таким образом предлагается рассмотреть модель (2.11), (2.13) – (2.18).

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.

Большинство проблем совместимости межзонных связей и контролируемых сечений при минимизации дефицита мощности в постановках задачи (2.11) – (2.16) и (2.11), (2.13) – (2.18) удастся избежать путем добавления ряда условий в процесс расчета, но проблема учета шунтов остаётся нерешенной для постановки (2.11) – (2.16).

2.2.4. Нелинейная модель с квадратичными потерями при передаче мощности

Модель МДМ ЭЭС с линейными потерями имеет допущения, касающиеся неполного учета потерь при перетоках мощности, так в [12], [82] 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. Для этого в модели (2.11) – (2.16) используются модифицированные балансовые ограничения, где заменены ограничения вида (2.12) на ограничения, представленные ниже:

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji} z_{ji}) z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n. \quad (2.19)$$

Таким образом, задачу МДМ можно представить в виде задачи нелинейного программирования. При исследовании моделей (2.11) – (2.16) и (2.11), (2.13) – (2.16), (2.19) (далее МДМ₁ и МДМ₂ соответственно) было выявлено, что эти модели имеют ряд недостатков, в частности, полученные решения могут иметь неверное потокораспределение, проявляющееся в виде одновременных встречных потоков мощности по одной межзональной связи.

2.2.5. Нелинейная модель с квадратичными потерями при перетоках мощности с меньшим числом переменных

В качестве улучшения существующей постановки задачи МДМ₂ с квадратичными потерями может использоваться модель, представленная в [14],

[66], где были проведены улучшения с целью сокращения количества оптимизируемых переменных по перетокам, т.е. вместо использования двух переменных, обозначающих перетоки мощности по межзональным связям для каждого направления, используется одна переменная, что в свою очередь избавляет от проблемы наличия перетоков мощности направленных в разные стороны по одной и той же связи. В качестве целевой функции используется (2.11), а ограничения (2.15) принимают следующий вид:

$$\underline{z}_j \leq z_j \leq \bar{z}_j, j = 1, \dots, n, \quad (2.20)$$

балансовые ограничения заменяются на следующие:

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^m t_{ij} z_j - \sum_{j=1}^m [\tilde{\alpha}_{ij}(z_j)] (z_j)^2 \geq 0, i = 1, \dots, n, \quad (2.21)$$

где n – число связей между узлами, t_{ij} – элементы матрицы связей, размера $m \times n$,

$$t_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{если связь начинается в зоне надежности } j \\ 1, & \text{если связь оканчивается в зоне надежности } j. \\ 0, & \text{если связь с зоной надежности отсутствует} \end{cases} \quad (2.22)$$

При этом функции $\tilde{\alpha}_{ij}(z_j)$ определяются следующим образом:

$$\tilde{\alpha}_{ij}(z_j) = \begin{cases} \alpha_j, & \text{если } t_{ij} z_j > 0 \\ 0, & \text{если } t_{ij} z_j \leq 0 \end{cases}, \quad (2.23)$$

$$i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n,$$

$$\underline{z}_j = -\bar{z}_j, \text{ для всех } j. \quad (2.24)$$

Необходимо обратить внимание, что в тех случаях когда полученное в результате оптимизации значение $z_j < 0$, то необходимо считать что переток направлен в обратную сторону относительно заданного направления, обозначенного в матрице t . Однако данная модель (2.11), (2.13), (2.14), (2.20) – (2.24), не может быть полноценно использована для расчетов ввиду наличия ограничения (2.24), где пропускная способность связи задается с одним и тем же значением для прямого и обратного направления. Такой способ задания перетоков

не совсем корректен по причине применения различных ограничений в прямом и обратном направлениях. Таким образом, необходимо избавиться от ограничения (2.24), тем самым позволив использовать различные пропускные способности связей по встречным направлениям. В то же время, ограничение (2.21) из-за перехода от равенства к неравенству не отвечает физике процесса и приводит к появлению неестественно больших значений генераторных мощностей, что фактически невозможно в реальных ЭЭС. Однако несмотря на наличие данных недостатков необходимо отметить, что снижение количества оптимизируемых переменных положительно сказывается на скорости и объеме расчетов.

2.3. Модификации моделей минимизации дефицита мощности

2.3.1. Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями, устранение встречных перетоков мощности

Получаемые оптимальные решения с помощью моделей МДМ₁ и МДМ₂ не обладают необходимой адекватностью с позиции физики процесса потокораспределения. В решении этой задачи могут присутствовать встречные перетоки мощности по межзонам связям. Также, трудно найти единственное решение из-за наличия «плато» или множества оптимальных решений.

Результаты работы моделей (2.11) – (2.16) и (2.11), (2.13) – (2.16), (2.19) при оценке балансовой надежности могут привести к искажению значений показателей надежности. Для устранения этой проблемы было сформулировано дополнительное ограничение для перетоков мощности [36], [39], широко известное в оптимизации, как «обнуление переменной», в данном случае ограничение представлено в следующем виде:

$$z_{ji} \cdot z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n . \quad (2.25)$$

Таким образом, ограничение (2.25) преобразует рассматриваемую задачу в корректную с точки зрения моделирования работы перетоков мощности между ЗН и меняет поведение модели на более правильное с точки зрения физики процесса

потокораспределения, а также формирует модель минимизации дефицита мощности с квадратичными потерями (2.11), (2.13) – (2.16), (2.19), (2.25) далее (МДМ₃). Дополнительное ограничение избавляет от проблемы физически неверных перетоков мощности, делая модель более адекватной, а также позволяет полноценно сравнивать её с моделью (2.11), (2.13), (2.14), (2.20) – (2.24).

2.3.2. Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями, двухэтапная оптимизация, оптимальное потокораспределение

Экспериментальные исследования показали, что несмотря на модификацию нелинейной модели и её представление в виде (2.11), (2.13) – (2.16), (2.19), (2.25), в виду наличия множества оптимальных решений существует неверное потокораспределение мощности. Иначе говоря – потокораспределение не является оптимальным, однако исходя из содержательной постановки задачи, требуется найти не только минимум дефицита мощности, но и корректное потокораспределение. Некорректное потокораспределение заключается в появлении кольцевых перетоков мощности.

Для решения этой проблемы был предложен ряд модификаций модели, описанных в [39-40], в первую очередь путем изменения балансовых ограничений типа равенств (2.19) – на ограничения типа неравенства. Данное ограничение предусматривало переход модели оценки дефицита мощности к виду задачи выпуклого программирования.

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji} z_{ji}) z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} \geq 0, i = 1, \dots, n. \quad (2.26)$$

Были проведены экспериментальные исследования данной модификации модели. В итоге было выявлено, что минимум дефицита мощности совпадает со значением модели МДМ₃. При этом физически неверное распределение перетоков мощности осталось, однако повысилась загрузка генераторных мощностей, что физически невозможно, так как излишки 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 (2.11), (2.13) – (2.16), (2.25), (2.26), такой подход обеспечит выпуклое множество допустимых решений. Далее, полученные оптимальные решения относительно переменной y_i необходимо зафиксировать и обозначить новую переменную как \tilde{y}_i . После чего перейти ко второму этапу решения, сформировав новую целевую функцию, которая является минимизацией суммы квадратов перетоков мощности:

$$\sum_{i=1}^n z_{ji}^2 \rightarrow \min, \quad (2.27)$$

а также заменить текущие балансовые ограничения (2.26), на модифицированные балансовые ограничения, представленные ниже:

$$x_i - \tilde{y}_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji} z_{ji}) z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij} = 0, i = 1, \dots, n. \quad (2.28)$$

Работоспособность данного подхода двухэтапной оптимизации модели с балансовыми ограничениями неравенствами (2.11), (2.13) – (2.16), (2.25), (2.26) и модели минимизации евклидовой нормы по перетокам (2.27), (2.13) – (2.16), (2.25) (2.28), была экспериментально проверена; полученные результаты показали работоспособность такого подхода [39-40]; получены корректные решения с физически адекватным распределением мощности.

2.3.3. Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями (учет 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 [36], [43]. В практике управления энергосистемами проводят учет не межзонных связей, а контролируемых сечений, где ограничения пропускной способности рассчитывают

для контролируемых сечений в виде максимально и аварийно допустимых перетоков активной мощности. Межзонные связи и контролируемые сечения с заданной характеристикой максимально допустимого перетока (МДП) мощности могут как совпадать по составу ЛЭП, входящих в них, так и не совпадать.

Таким образом, использование представленных выше моделей одноэтапной оптимизации без внесения дополнительных изменений становится невозможным, в связи с чем предлагается рассмотреть необходимые корректировки и дополнения для постановки математической задачи с квадратичными потерями.

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:

$$cS_{kf} = \begin{cases} 1, & \text{если ветвь присутствует в контр – ом сечении} \\ 0, & \text{если ветвь отсутствует в контр – ом сечении} \end{cases} \quad (2.29)$$

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.

$$\sum_{f=1}^m cS_{kf} \cdot z_f^{\text{прям}} \leq md_{k1}; k = 1, \dots, l, \quad (2.30)$$

$$\sum_{f=1}^m cS_{kf} \cdot z_f^{\text{обп}} \leq md_{k2}; k = 1, \dots, l, \quad (2.31)$$

где $z_f^{\text{прям}}$ – прямой переток мощности z_{ij} (МВт), а $z_f^{\text{обп}}$ – обратный переток мощности (МВт), т.е. z_{ji} , которые определяются при формировании матрицы S . Таким образом, существующая модель МДМ₃ (2.11), (2.13) – (2.16), (2.19), (2.25) должна быть преобразована в модель (2.11), (2.13) – (2.16), (2.19), (2.25), (2.29) – (2.31) для моделирования работы и загрузки контролируемых сечений. Однако в таком случае появляется проблема двусторонней загрузки КС, решаемая путем добавления дополнительных ограничений на КС:

$$\left(\sum_{f=1}^m cS_{kf} \cdot z_f^{\text{прям}} \right) \cdot \left(\sum_{f=1}^m cS_{kf} \cdot z_f^{\text{обр}} \right) = 0; i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n. \quad (2.32)$$

Данное ограничение помимо физически корректного распределения потоков мощности по сечениям в одном из направлений, позволяет также убрать из модели ограничение (2.25), ввиду дублирования действий по направлению перетоков мощности. Итогом вышеописанных дополнений и изменений является следующая модель минимизации дефицита мощности с квадратичными потерями и учетом контролируемых сечений (2.11), (2.13) – (2.16), (2.19), (2.29) – (2.32) (далее МДМ₄).

2.3.4. Вариант модификации нелинейной модели с квадратичными потерями и меньшим числом переменных, с учетом контролируемых сечений

Учитывая, что (2.11), (2.13), (2.14), (2.20) – (2.24) имеет ряд преимуществ, а именно отсутствие встречных перетоков и снижение количества переменных, предлагается внести изменения, позволяющие убрать возможную неоднозначность решения, а также сделать возможным использование данной модели в рамках расчетов с использованием реальных данных и ограничений по контролируемым сечениям. В [36], [43] предлагается рассмотреть следующую постановку математической задачи: целевая функция (2.11), а также верхние и нижние ограничения на переменные генерации и нагрузки (2.13) – (2.15), матрица определяющая направление потоков мощности по связям (2.22), а также функции расчёта коэффициента потерь $\tilde{\alpha}_{ij}(z_j)$ – (2.23) остаются без изменений. Для исключения возможности появления запертой генерации, балансовые ограничения (2.21) заменяются следующими ограничениями типа равенства:

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^m t_{ij} z_j - \sum_{j=1}^m [\tilde{\alpha}_{ij}(z_j)] (z_j)^2 = 0, i = 1, \dots, n, \quad (2.33)$$

Ограничение (2.24) не позволяет использовать разные пропускные способности перетоков мощности в прямом и обратном направлении и противоречит физике процесса работы ЭЭС. Таким образом, формируется

модифицированная модель минимизации дефицита мощности следующего вида: (2.11), (2.13), (2.14), (2.20), (2.22) – (2.24), (2.33). Для учета контролируемых сечений в полученной модели, необходимо воспользоваться матрицей КС – S , элементы которой необходимо изменить, поэтому вместо элементов (2.29) необходимо использовать следующие:

$$cs_{kf} = \begin{cases} 1, \text{ если связь с прямым напр – ем относится к КС} \\ -1, \text{ если связь с обратным напр – ем относится к КС.} \\ 0, \text{ если связь отсутствует в контр – ом сечении} \end{cases} \quad (2.34)$$

Помимо преобразований элементов матрицы S , также необходимо изменить ограничения контролируемых сечений, приведенных в (2.30) – (2.31), на ограничения вида:

$$\text{Если } (z_f) \geq 0, \text{ то } (cs_{kf} \cdot z_f) \leq md_{k1}; k = 1, \dots, l, f = 1 \dots m, \quad (2.35)$$

$$\text{Если } (z_f) < 0, \text{ то } (cs_{kf} \cdot z_f) \geq md_{k2}; k = 1, \dots, l, f = 1 \dots m, \quad (2.36)$$

где z_f – переток мощности z_j (МВт), а его направление определяется в матрице S . Таким образом формируется модифицированная модель минимизации дефицита мощности с учетом контролируемых сечений, которая примет следующий вид: (2.11), (2.13), (2.14), (2.20), (2.22) – (2.24), (2.33) – (2.36). Однако реализация данных ограничений сложна и требует для решения – методов дискретной оптимизации.

2.3.5. Модификация нелинейной модели с квадратичными потерями и матрицей сетевых коэффициентов

Развитием обеих представленных моделей минимизации дефицита мощности (2.11) – (2.16) и (2.11), (2.13) – (2.18) может быть их объединение и учет как сетевых коэффициентов, так и квадратичных потерь мощности. При этом балансовое ограничение (2.18) примет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^I x_i = \sum_{i=1}^I y_i + \sum_{j=1}^J a_{ji} z_{ji}^2 \quad (2.37)$$

С методикой формирования матриц сетевых коэффициентов можно ознакомиться в [83-84]. Полученная модель (2.11), (2.13) – (2.18), (2.37) была испытана на тестовых схемах и показала свою адекватность и эффективность.

2.4. Характеристика методов минимизации дефицита мощности

Разработанные математические модели минимизации дефицита мощности могут применяться для формирования задач, с ограничениями для каждого конкретного случайно сформированного состояния определённой ЭЭС, однако поставленную задачу также необходимо решать, т.е. существует необходимость проведения оптимизации. Таким образом, определение минимума дефицита мощности расчетных, случайных состояний ЭЭС является не менее 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 проделанных экспериментов, а также наличия «занулённых» ограничений равенств, можно сделать обоснованный вывод о том, что задача является многоэкстремальной.

В известной отечественной и зарубежной практике для поиска дефицитов мощности применяются различные методы оптимизации [57-67], которые были

освещены и охарактеризованы в обзорной части (Глава 1.4). Для решения нелинейных задач в отечественных комплексах применялся метод внутренних точек [10], [14], а в известных зарубежных комплексах использовались высокоуровневые системы моделирования для математической оптимизации и решатели, GAMS и CPLEX, в которые входили различные нелинейные решатели. К сожалению, данные комплексы являются закрытыми программными решениями без доступа к исходному коду, а также ограничены в использовании коммерческими лицензиями. Основное ограничение, накладываемое применением данных комплексов к реализации собственного программного обеспечения, является передача модели и ее параметров в файловом формате, что снижает производительность расчетов и не позволяет их полноценно использовать.

Недостатком алгоритма внутренних точек является то, что он требует существования «внутреннего множества» D_0 допустимой области D , т.е. он не позволяет решать задачи нелинейного программирования с ограничениями типа равенств, представленных в исследуемых моделях. Кроме того, для использования этого алгоритма необходимо знать начальное приближение x^0 , в котором все ограничения удовлетворяются как строгие неравенства. Для решения данных проблем применяются штрафные функции. Однако работа метода внутренних точек может быть рассмотрена как «тяжелые» итеративные вычисления, где на каждой итерации требуется вычисление барьерных функций, градиентов, множителей Лагранжа и проведение оптимизации методом Ньютона включая матричные вычисления и ограничения на функцию.

В связи с невозможностью полноценно использовать коммерческие решатели в разрабатываемом программном комплексе, а также необходимостью избавиться от тяжеловесных вычислений с целью повышения скорости вычисления, было предложено реализовать и исследовать работоспособность различных градиентных и эвристических методов относительно задачи МДМ [85-89], что также отражено в данной главе. Так, метод сопряженных градиентов для квадратичных функций гарантирует сходимость за конечное число шагов, а нужная точность может быть достигнута значительно раньше. В тоже время, набор

эвристических методов глобальной оптимизации к каждому из которых могут быть применены технологии распараллеливания показывают высокую скорость работы и точность найденных решений.

2.4.1. Метод штрафных функций для задачи минимизации дефицита мощности

В виду того что предлагаемые модели МДМ включают в себя балансовые ограничения, а также ограничения по оптимизируемым переменным их необходимо учитывать при оптимизации. Обозначенные ранее градиентные и эвристические методы оптимизации предназначены для решения задач безусловной оптимизации (оптимизация только целевой функции, без ограничений), поэтому существует необходимость обхода данного ограничения. Для перехода от задачи параметрической оптимизации с ограничениями к задаче без ограничений [90], или задаче безусловной оптимизации возможно применить один из следующих методов [91]: метод штрафных функций; метод неопределенных множителей Лагранжа; метод барьерных функций. Например, для решения задачи в нелинейной постановке в комплексе ЯНТАРЬ использовались метод Лагранжа и различные вариации метода внутренних точек. В виду того что основной проблемой при использовании метода Лагранжа является значительное увеличение размерности задачи параметрической оптимизации, в качестве основного метода, для преобразования задач от условных к безусловным в этой работе, будет использоваться метод штрафных функций.

Метод штрафных функций можно применить к задачам оптимизации с различными типами ограничений [91-92]. Преобразование к безусловной задаче позволяет, использовать не только более простые методы решения задач линейного и нелинейного программирования, но и повышать точность расчетов при правильном подборе параметров. 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.

Разработанные модели содержат в себе разные виды ограничений в том числе ограничения равенства и неравенства. Использование метода внешних штрафных функций позволяет решать задачи условной оптимизации, при наличии как ограничений равенств, так и ограничений неравенств. Стратегия поиска метода внешних штрафных функций предполагает, что в данном методе, штрафные функции $\Phi(x, \gamma)$ выбирают таким образом, чтобы их значения были равны нулю внутри и на границе допустимой области G , а вне ее - положительны и возрастали тем больше, чем сильнее нарушаются ограничения (Рисунок 3.1). Таким образом, здесь “штрафуется” удаление от допустимой области G .

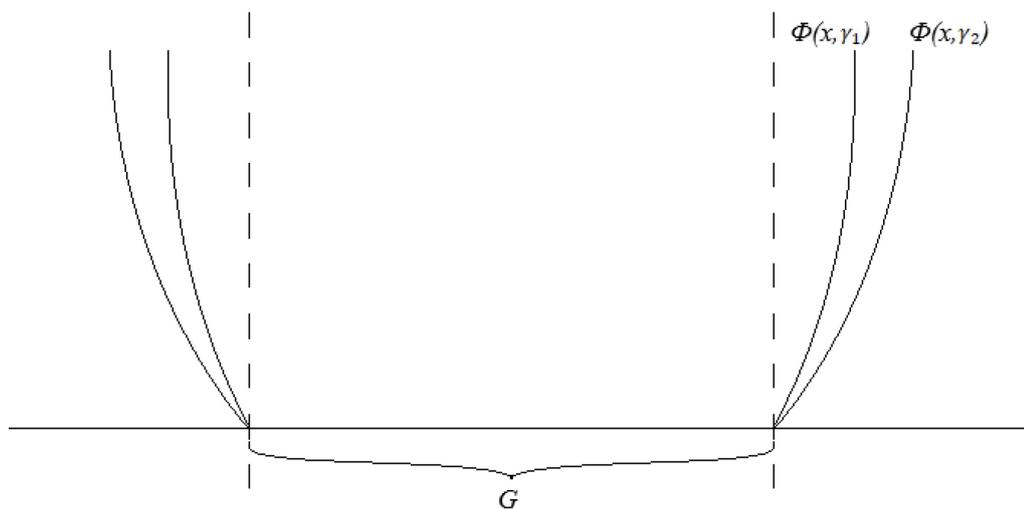


Рисунок 2.1 – График стратегии поиска (при $\gamma_2 > \gamma_1$)

Начальная точка поиска обычно задается вне множества допустимых решений G . На каждой k -й итерации ищется точка $x^*(\gamma^k)$ безусловного минимума вспомогательной функции $F(x, \gamma^k)$ по x при заданном параметре γ^k с помощью одного из выбранных для исследований метода безусловной оптимизации – относящегося к группе градиентных или эвристических. Полученная точка $x^*(\gamma^k)$ используется в качестве начальной на следующей итерации, выполняемой

при возрастающем значении параметра штрафа. Таким образом повышается точность найденного решения. При неограниченном росте γ^k последовательность $x^*(\gamma^k)$ сходится к точке условного минимума x^* .

Для преобразования поставленной условной нелинейной модели с квадратичными потерями при перетоках мощности, будет применяться метод штрафных функций, как описано в [39]. Далее для составления вспомогательной функции требуется объединить ограничения в нужном формате во внешнюю штрафную функцию для модели МДМ₃ которая будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \Phi(x, y, z, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \gamma) \\
 &= \frac{\gamma}{2} \left(\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (\varphi_i(z_{ji}, z_{ij}))^2 \right. \\
 &+ \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \left(\left(\max(0, t_j(x, y, z_{ji}, a_{ji})) \right) \right)^2 \\
 &+ \left(\max(0, g_j(x)) \right)^2 + \left(\max(\bar{x}, g_j(x)) \right)^2 \\
 &+ \left(\max(0, g_j(y)) \right)^2 + \left(\max(\bar{y}, g_j(y)) \right)^2 \\
 &\left. + \left(\max(0, g_j(z_{ji})) \right)^2 + \left(\max(\bar{z}_{ji}, g_j(z_{ji})) \right)^2 \right).
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

С помощью параметра γ регулируется значение множителя штрафа, в данной задаче применяется постепенное увеличение штрафа на 1 порядок в итерацию метода штрафных функций, начальное значение данного параметра равно 10. Остальные параметры штрафной функции раскрываются в соответствии с имеющимися ограничениями, где ограничения равенства выступают в роли параметров штрафной функции:

$$\varphi_i(z_{ji}, z_{ij}) = z_{ji} \cdot z_{ij}. \tag{3.9}$$

В качестве ограничений неравенств выступают:

$$\max(0, t_j(x, y, z_{ji}, a_{ji})) = \begin{cases} 0, t_j(x, y, z_{ji}, a_{ji}) \leq 0 \\ t_j(x, y, z_{ji}, a_{ji}), t_j(x, y, z_{ji}, a_{ji}) > 0 \end{cases}, \quad (3.10)$$

$$t_j(x, y, z_{ji}, a_{ji}) = x_i - y_i + \sum_{j=1}^n (1 - a_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^n z_{ij}, \quad (3.11)$$

$$\max(0, g_j(x)) = \begin{cases} 0, g_j(x) \leq 0 \\ g_j(x), g_j(x) > 0 \end{cases}, \quad (3.12)$$

$$\max(\bar{x}, g_j(x)) = \begin{cases} \bar{x}, g_j(x) \geq \bar{x} \\ g_j(x), g_j(x) < \bar{x} \end{cases}, \quad (3.13)$$

$$\max(0, g_j(y)) = \begin{cases} 0, g_j(y) \leq 0 \\ g_j(y), g_j(y) > 0 \end{cases}, \quad (3.14)$$

$$\max(\bar{y}, g_j(y)) = \begin{cases} \bar{y}, g_j(y) \geq \bar{y} \\ g_j(y), g_j(y) < \bar{y} \end{cases}, \quad (3.15)$$

$$\max(0, g_j(z_{ji})) = \begin{cases} 0, g_j(z_{ji}) \leq 0 \\ g_j(z_{ji}), g_j(z_{ji}) > 0 \end{cases}, \quad (3.16)$$

$$\max(\bar{z}_{ji}, g_j(z_{ji})) = \begin{cases} \bar{z}_{ji}, g_j(z_{ji}) \geq \bar{z}_{ji} \\ g_j(z_{ji}), g_j(z_{ji}) < \bar{z}_{ji} \end{cases}. \quad (3.17)$$

Таким образом исследуемая задача МДМ₃ была трансформирована из задачи условной оптимизации к задаче безусловной оптимизации, а полученная целевая функция, преобразованная с помощью метода штрафных функций, может быть внедрена в программный комплекс и позволит решать поставленные задачи МДМ с помощью градиентных и эвристических методов оптимизации.

2.4.2. Применение группы градиентных методов к задаче минимизации дефицита мощности

Решение задачи минимизации дефицита мощности должно проводиться эффективными методами с целью получения точных и адекватных результатов. В

настоящее время для решения задач оптимизации разработано огромное количество различных математических методов. Применение того или иного метода определяется постановкой задачи, сложностью вычисления функции и ее производных, поведением функции и т. д. В этой работе эффективность метода оптимизации рассматривается с точки зрения малых затрат времени и ресурсов на достижение качественного результата – адекватного и точного. Так как в работе рассматриваются нелинейные модели с ограничениями, для их оптимизации могут быть использованы методы первого либо второго порядка. Так же по результатам анализа используемых ранее алгоритмов метода внутренних точек было принято решение провести исследование итерационных методов первого порядка с меньшей, по сравнению с методом внутренней точки, сложностью внутренних операций.

В качестве методов первого порядка были выбраны метод градиентного спуска, наискорейшего градиентного спуска и метод сопряженных градиентов. Таким образом, была решена одна из задач диссертации – сравнение работы и эффективности группы градиентных методов оптимизации применительно к задаче минимизации дефицита мощности. Градиентные методы – группа итерационных численных методов (первого порядка) в основе которых лежит поиск экстремума (минимума или максимума) целевой функции направления наиболее быстрого возрастания (убывания) функции, т.е. в направлении градиента (антиградиента) функции [85 - 87], [91].

Градиентом функции в точке $X = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$ называется вектор, проекциями которого на координатные оси являются частные производные функции по координатам.

Частные производные характеризуют изменение функции по каждой независимой переменной в отдельности. Образованный с их помощью вектор градиента дает общее представление о поведении функции в заданной окрестности точки. Для работы группы градиентных методов одним из основных требований, выдвигаемых к задаче является дифференцируемость целевой функции, при этом разработанные модели МДМ данному требованию удовлетворяли.

В первую очередь был реализован метод градиентного спуска, который является неким каркасом или основой для последующих 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 $\|f(X_{k+1}) - f(X_k)\| < Eps$; градиент целевой функции в точке локального минимума приближается к нулю $\|F'(X_k)\| < Eps$;

Алгоритм 1. Градиентный спуск

Инициализация:

n – количество оптимизируемых параметров

$X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – начальное приближение в рамках ограничений

h – величина шага по антиградиенту

K_max – максимальное количество итераций

Рабочая часть:

$F = f(X_k)$

while (критерий останова не выполнен **или** $K \neq K_max$) **do**

for (*i with each individual X_i*) **do**

$X_k^i = X_k^i - h * (\nabla f(X_k^i))$

end for

$F = f(X_k)$

$K = K + 1$

end while

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, работа с большим количеством переменных сопровождалась длительным ожиданием, на решение задач с количеством переменных свыше 20 неизвестных требовалось более 30 секунд, а также было необходимо менять параметры шага в зависимости от моделируемой системы.

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.

Условие (правило Армихо) [93-94] является адаптивным методом поиска величины шага расчета, которое говорит о том, что функция $f\{x_k \pm \lambda \cdot g(X_k)\}$ не должна превышать значения некоторой убывающей линейной функции, равной $f(X_k)$ в нуле:

$$f\{x_k - \lambda \cdot g(x_k)\} \ll f(X_k) - \sigma \cdot \lambda \cdot \nabla f_k \cdot g(X_k), \quad (3.18)$$

где коэффициент $\sigma \in (0,1)$, а шаг расчета λ определяется итеративно путем умножения первоначального шага λ_0 на коэффициент $\beta \in (0,1)$ до тех пор пока не будет выполняться условие.

Данное правило требует однократного вычисления градиента, после чего небольшое количество итераций затрачивается на подбор подходящего шага. Каждая из таких вложенных итераций, в свою очередь, требует вычисления значения целевой функции без градиента, то есть проводимые испытания относительно легковесны. Следует отметить, что данное условие удовлетворяется для всех достаточно малых λ

В ходе исследований корректирующие значения для работы правила Армихо в методах наискорейшего спуска и сопряженных градиентов для решения задачи МДМ₃ были подобраны самостоятельно и определены как $\beta = 0.85$, и $\sigma = 10^{-4}$. В условиях экспериментов количество итераций, затрачиваемых на поиск не превышали 14, и в целом данное правило имело высокую скорость сходимости, а также обеспечивало достаточную точность шага расчета для метода наискорейшего спуска.

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 останковки метода в локальных минимумах все еще оставалась.

Алгоритм 2. Наискорейший градиентный спуск

Инициализация:

n – количество оптимизируемых параметров

$X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – начальное приближение в рамках ограничений

$X_temp = \{x_{t_1}, \dots, x_{t_n}\}$ – переменная для временного хранения

$h = 1$ – величина шага по антиградиенту

K_max – максимальное количество итераций

$\beta = 0.85$

$\sigma = 10e - 4$

Рабочая часть:

$F = f(X_k)$

while (критерий останова не выполнен **или** $K \neq K_max$) **do**

// вычисление шага по правилу Армико

pow = 0

while (true)

$h = h \cdot \beta^{pow}$

for (i with each individual X_temp_i) **do**

$X_temp_i = X_k^i - h * (\nabla f(X_k^i))$

end for

$f_1 = f(X_k)$

$s_n = (\nabla f(X_k))^2$

$f_2 = f(X_k) - s_n \cdot h \cdot \nabla f(X_k)$

If ($f_1 \leq f_2$) **break;**

else pow = pow + 1;

end while

// вычисление новой точки

for (i with each individual X_i) **do**

$X_k^i = X_k^i - h * (\nabla f(X_k^i))$

end for

$F = f(X_k)$

$K = K + 1$

end while

Для решения проблемы попадания и остановки метода в локальных минимумах, которые зачастую являлись неоптимальным решением, была применена стратегия множественного запуска (multistart) метода из разных точек сгенерированных в рамках ограничений по параметрам.

Такой подход позволял увеличить шанс нахождения глобального минимума путем сравнения всех полученных решений, где минимальное значение соответствует глобальному. В данном случае проблема локальных минимумов решилась, однако множественные запуски привели к увеличению требуемых вычислительных ресурсов, а также росту времени счета, что объективно снизило эффективность работы метода. Таким образом необходимо было повысить скорость счета и снизить объем потребляемых ресурсов, в связи с этим был реализован метод сопряженных градиентов.

Метод сопряженных градиентов 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. Новое сопряженное направление получается сложением градиента (антиградиента) в точке поворота и предыдущего направления движения, умноженного на коэффициент. Таким образом, метод сопряженных градиентов формирует направление поиска к оптимальному значению используя информацию о поиске полученную на предыдущих этапах спуска.

$$\beta_k = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \right)_k^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \right)_{k-1}^2}, \quad (3.19)$$

$$P_k = \nabla f(X_k) + \beta_k \cdot P_{k-1}, \quad (3.20)$$

где P_k – значение текущей точки. В данном случае коэффициент, вычисленный по формуле Флетчера-Ривса в формульной записи представлен под

(3.19). Вычисление шага также должно быть выполнено путем одномерной оптимизации, в данном случае использовался линейный поиск по правилу Армихо как и в предыдущем методе.

Важной составляющей является момент рестарта вычисления коэффициента, который обычно соотносится с размерностью задачи, т.е. количеством оптимизируемых переменных.

Алгоритм 3. Наискорейший градиентный спуск

Инициализация:

n – количество оптимизируемых параметров

$X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – начальное приближение в рамках ограничений

$h = 1$ – величина шага по антиградиенту

K_max – максимальное количество итераций

β_K – коэффициент по формуле Флетчера-Ривса

R – счетчик до рестарта

$Restart$ – момент рестарта

Рабочая часть:

$F = f(X_K)$

while (критерий останова не выполнен **или** $K \neq K_max$) **do**

if ($R = 0$) $P_K = \nabla f(X_K)$

else

$P_K = \nabla f(X_K) + \beta_R \cdot P_{K-1}$

$R = R + 1$

end if

for (i with each individual X_i) **do**

$X_K^i = X_K^i - Armijo(h) * (P_K)$

end for

if ($R = Restart$) $R = 0$

$F = f(X_K)$

$K = K + 1$

end while

Метод сопряженных градиентов показал большую скорость сходимости чем метод наискорейшего спуска, а также большую устойчивость к остановке в локальном минимуме, тем не менее данный метод все еще требовал использования

множественного старта из-за небольшой нестабильности нахождения глобальных минимумов. Доступное для оптимизации число переменных также выросло, однако время расчета больших схем (свыше 100 переменных) все еще занимало больше 2 минут.

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 ресурсам.

2.4.3. Применение группы методов дифференциальной эволюции к задаче минимизации дефицита мощности

Корректная работа метода оптимизации с математической моделью зачастую требует тщательной настройки метода, однако такая настройка не гарантирует полноценную работу метода с этой же моделью, но с другими данными. В случае градиентных методов требовались дополнительные настройки расчетов шага, рестарта и других коэффициентов, тем не менее одни и те же настройки не давали стабильных результатов. Одна из наиболее известных проблем градиентных методов – попадание в локальный минимум, где условия модели удовлетворяются, но найдено не глобальное решение, а устройство метода не позволяет выбраться за пределы локального минимума. Одним из способов решения данной проблемы являются множественные запуски метода из разных начальных точек, в таком случае достижение глобального минимума в целом возможно, но также не гарантировано и требует больше времени на вычисления для одного состояния.

С целью добиться большей скорости поиска глобального минимума 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,

однако не требует работы с переменными в бинарном коде [88-89]. Данный метод имеет различные вариации самонастройки, что делает его более универсальным и позволяет классифицировать, как группу методов.

Для работы метода DE требуется только вычисление значений целевой функций, но не её производных. Это означает, что существует возможность сократить время расчета и не использовать времязатратную процедуру дифференцирования на каждом шаге итерационного процесса. Дифференциальная эволюция предназначена для нахождения глобального минимума (или максимума) не дифференцируемых, нелинейных, мультимодальных (большое число локальных экстремумов) функций от многих переменных. Метод прост в реализации и использовании, содержит мало управляющих параметров, не требующих тщательного подбора, т.к. существуют заранее заготовленные рабочие схемы, а некоторые из вариаций метода имеют механизмы самонастройки.

Алгоритм ведет поиск пространства с решением, поддерживая популяцию возможных решений (отдельных векторов, возможных решений) и создавая новые, комбинируя существующие вектора в соответствии с определенным процессом. 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.

Одной из особенностей метода является учет верхних и нижних ограничений на этапе вычисления новых особей (вектор с решением в популяции), что упрощает работу с целевой функцией, не перегружая ее дополнительными штрафными ограничениями. Модульная структура метода позволяет применять технологии распараллеливания с механизмами синхронизации, что позволяет проводить расчеты быстрее.

Алгоритм метода дифференциальной эволюции представляет собой легко модифицируемый конструктор. Стандартный алгоритм, разработанный Сторном и Прайсом в 1997г. [88], [95], состоит из нескольких блоков. Блок 1 включает в себя определение изначальных 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, чем более равномерным будет распределение в пределах верхних и нижних ограничений, тем больше вероятность нахождения глобального решения. В работе использовался генератор псевдослучайных чисел Mersenne Twister (C++, std::mt19937) для формирования начальной популяции. Далее для каждого вектора из текущей популяции, называемого целевым, проводится несколько последовательных операций.

Блок 3 – мутация, в данном случае понимается формирование нового вектора мутанта и вычисление значения его целевой функции в рамках определенной стратегии мутации с применением параметра F.

Разберем основную идею мутации для стратегии DE/rand/1. Для каждого выбранного целевого вектора $x_G^i, i = 1, 2, \dots, NP$ из популяции случайным образом подбираются несколько уникальных вспомогательных родительских векторов. Для данной стратегии необходимы 3 вектора $x_G^{r1}, x_G^{r2}, x_G^{r3}$, где $r1, r2, r3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ и $i \neq r1 \neq r2 \neq r3$. Далее с помощью стратегии мутации DE/rand/1 генерируется вектор мутант x_G^{mut} :

На практике же существует и применяется множество различных стратегий мутации [96-97].

$$\text{DE/best/1} \quad x_G^{mut} = x_G^{best} + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}), \quad (3.21)$$

$$\text{DE/rand/1} \quad x_G^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}), \quad (3.22)$$

$$\begin{array}{l} \text{DE/current to} \\ \text{rand/1} \end{array} \quad x_G^{mut} = x_G^i + F(x_G^{r1} - x_G^i) + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}), \quad (3.23)$$

$$\begin{array}{l} \text{DE/current to} \\ \text{best/1} \end{array} \quad x_G^{mut} = x_G^i + F(x_G^{best} - x_G^i) + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}), \quad (3.24)$$

$$\text{DE/rand/2} \quad x_G^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}) + F(x_G^{r4} - x_G^{r5}), \quad (3.25)$$

$$\text{DE/best/2} \quad x_G^{mut} = x_G^{best} + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}) + F(x_G^{r3} - x_G^{r4}), \quad (3.26)$$

$$\text{DE/rand/3} \quad x_G^{mut} = x_G^{r1} + F(x_G^{r2} - x_G^{r3}) + F(x_G^{r4} - x_G^{r5}) + F(x_G^{r6} - x_G^{r7}), \quad (3.27)$$

$$\text{DE/best/3} \quad x_G^{mut} = x_G^{best} + F(x_G^{r1} - x_G^{r2}) + F(x_G^{r3} - x_G^{r4}) + F(x_G^{r5} - x_G^{r6}). \quad (3.28)$$

Такой подход позволяет ориентироваться на более сильную особь (вектор) в популяции, что иногда приводит к более быстрому решению либо ее вырождению и оседанию всех особей на локальных минимумах.

В блоке 4 происходит операция скрещивания, где с учетом параметра CR из мутантного и целевого векторов, поэлементно формируется новый trial вектор. Происходит это следующим образом, для каждого из элементов вектора формируется случайное число $Ir_{and} \in \{1, 2, \dots, N\}$, и случайное число $r_{v,j} \in \{0.0, 1.0\}$ далее проверяется условие:

$$u_{G,j}^i = \begin{cases} x_{G,j}^{mut}, & \text{если } r_{v,j} \leq CR \text{ или } j = Ir_{and} \\ x_{G,j}^i, & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad j = \{1, \dots, N\}. \quad (3.29)$$

Блок 5 – блок выбора завершает процедуру формирования нового члена популяции, в данном блоке определяется, какой из векторов будет продолжать существование – trial вектор или целевой, определение происходит за счет сравнения значений целевых функций.

$$x_{G+1}^i = \begin{cases} u_G^i, & \text{если } f(u_G^i) \leq f(x_G^i) \\ x_G^i, & \text{в остальных случаях} \end{cases}. \quad (3.30)$$

Обновление поколений происходит циклично до тех пор, пока их количество не будет полностью исчерпано, или будет достигнут другой критерий останова.

В рамках работы было проведено исследование различных вариантов методов DE в том числе с заранее заданными параметрами, а также самонастраивающихся в процессе работы метода. Универсальный алгоритм стандартного метода дифференциальной эволюции, который включает в себя все

основные блоки по формированию и работы с популяциями и настроечными параметрами представлен далее.

Алгоритм 4: Псевдокод DE.
<p>Инициализация: N = размерность задачи; $NP = N * 10$; $F = \text{rand}(0.1, 1.0)$; $CR = \text{rand}(0.0, 1.0)$; $P_max = 50000$; $G = 1$;</p> <p>P_G = инициализация популяции случайными числами; while (критерий останова не удовлетворен или $G \neq P_max$) do $best$ = определить лучший вектор for i with each individual x_G^i in P_G do x_G^{mut} = Мутация (Стратегия мутации, F, x_G^i, $best$) u_G^i = Скрещивание (CR, x_G^i, x_G^{mut}) x_{G+1}^i = Выбор (x_G^i, u_G^i) end for $G = G + 1$ end while</p>

В первую очередь был рассмотрен метод coDE, разработанный в 2011 году [98]. Алгоритм coDE повторяет основную идею стандартного DE, однако имеет несколько иной подход. Изначально формируется по три парных значения для параметров F и CR , далее в рамках формирования новых векторов с помощью блока 3 рассчитываются три мутантных вектора, в качестве стратегий мутации используются: DE/rand/1; DE/rand2; DE/current to rand/1;

Зачастую данный метод работает медленнее стандартного метода DE с жестко заданными значениями параметров F и CR и одним видом мутации, однако данный метод уже не требует настройки параметров эмпирическим путем и играет роль универсального метода.

Алгоритм 5: Псевдокод CODE.

Инициализация:

N = размерность задачи; $NP = N * 10$;

$F_CR_pool [1] = [F_1=1.0, CR_1=0.1]$;

$F_CR_pool [2] = [F_2=1.0, CR_2=0.9]$;

$F_CR_pool [3] = [F_3=0.8, CR_3=0.2]$;

$P_max = 50000$;

$G = 1$;

P_G = инициализация популяции случайными числами;

while (критерий останова не удовлетворен **или** $G \neq P_max$) **do**

best = определить лучший вектор

for i with each individual x_G^i in P_G **do**

F_1, CR_1 = случайная пара(F_CR_pool)

x_G^{mut-1} = Мутация ($DE/rand/1, F_1, x_G^i$)

u_G^{i-1} = Скрещивание (CR_1, x_G^i, x_G^{mut-1})

x_G^{mut-2} = Мутация ($DE/rand2, F_2, x_G^i$)

u_G^{i-2} = Скрещивание (CR_2, x_G^i, x_G^{mut-2})

x_G^{mut-3} = Мутация ($DE/current to rand/1, F_3, x_G^i$)

u_G^{i-3} = Скрещивание (CR_3, x_G^i, x_G^{mut-3})

u_G^i = Определить лучший среди ($u_G^{i-1}, u_G^{i-2}, u_G^{i-3}$)

x_{G+1}^i = Выбор (x_G^i, u_G^i)

end for

$G = G + 1$

end while

Метод coDE не является самонастраивающимся т.к. имеет заранее определенные параметры, поэтому далее был реализован метод jDE [98-99], где для каждого вектора в популяции самостоятельно определяются вектора F_G и CR_G . Данный метод позволяет решать задачи быстрее стандартного метода DE и coDE без необходимости тонкой или грубой настройки, параметры рассчитываются в процессе решения задачи минимизации дефицита мощности.

Алгоритм 6: Псевдокод jDE.

Инициализация:

N = размерность задачи; $NP = N * 10$;

$F = \text{rand}(0.1, 1.0)$;

$CR = \text{rand}(0.0, 1.0)$;

$F_l = 0.1$; $F_u = 0.9$;

$\tau_1 = 0.1$; $\tau_2 = 0.1$;

$P_max = 50000$;

$G = 1$;

P_G = инициализация популяции случайными числами;

$F_{pool\ G}$ = инициализация по F для каждого вектора

$CR_{pool\ G}$ = инициализация по CR для каждого вектора

while (критерий останова не удовлетворен **или** $G \neq P_max$) **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)

//подбор параметров F и CR

$$F_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} F_l + \text{случ. число}(0.0, 1.0)_1 \cdot F_u, & \text{если случ. ч. } (0.0, 1.0)_2 < \tau_1, \\ F, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$CR_{pool\ G+1}^i = \begin{cases} \text{случ. число}(0.0, 1.0)_3, & \text{если случ. число}(0.0, 1.0)_4 < \tau_2, \\ CR, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

end for

$G = G + 1$

end while

Еще одним методом в рамках исследования был реализован метод chDE. В данном случае к методу DE применяется схема теории хаоса. Способ хранения новых настроечных параметров в целом совпадает с ранее рассмотренным методом jDE, основное отличие наблюдается в способе расчета самих параметров метода chDE [99], [100-101]. Алгоритм метода представлен ниже:

Алгоритм 7: Псевдокод chDE.

Инициализация:

N = размерность задачи; $NP = N \cdot 10$;

$P_max = 50000$;

$\mu = 4$;

$G = 1$;

P_G = инициализация популяции случайными числами;

$F_{pool\ G}$ = инициализация $\text{rand}(0.0, 1.0) \notin \{0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0\}$ для каждого вектора;

$CR_{pool\ G}$ = инициализация $\text{rand}(0.0, 1.0) \notin \{0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0\}$ для каждого вектора;

while (критерий останова не удовлетворен **или** $G \neq P_max$) **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)

//подбор параметров F и CR

$F_{pool\ G+1}^i = \mu \cdot F_{pool\ G}^i \cdot [1 - F_{pool\ G}^i]$;

$CR_{pool\ G+1}^i = \mu \cdot CR_{pool\ G}^i \cdot [1 - CR_{pool\ G}^i]$;

end for

$G = G + 1$

end while

Идея работы алгоритма aDE [98] очень схожа с предыдущими алгоритмами, для начала происходит инициализация параметров по той же схеме, как и в jDE. Отличительной чертой является способ формирования новых параметров F и CR . В качестве параметра, регулирующего способ задания параметров F и CR , выступает значение среднего арифметического от целевых функций популяции f_{avg} .

Алгоритм 8: Псевдокод aDE.

Инициализация:

N = размерность задачи; $NP = N * 10$;

$P_max = 50000$;

$f_{avg} = 0$;

$G = 1$;

P_G = инициализация популяции случайными числами;

$F_{pool\ G}$ = инициализация $\text{rand}(0.1, 1.0)$ для каждого вектора

$CR_{pool\ G}$ = инициализация $\text{rand}(0.0, 1.0)$ для каждого вектора

while (критерий останова не удовлетворен **или** $G \neq P_max$) **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)

//подбор параметров F и CR

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

Данная вариация метода дифференциальной эволюции имеет существенные отличия, усложняющие стандартный метод DE и описана в [102]. Основная идея самонастройки так же, как и в предыдущих методах состоит в вычислении параметров F и CR для каждого отдельного вектора в популяции, однако подход таких вычислений существенно отличается. На каждой итерации с изменением поколения вычисляются ограничения области для вычисления случайных значений параметров F и CR , а также используется не стандартная вариация стратегии мутации DE/current-to-pbest/1. Существует два варианта работы метода JADE – либо с, либо без архива не прошедших этап «выбора» векторов. В первую очередь

нужно разобраться со стратегией мутации. В случае, если используется вариант стратегии без архива, в данном случае подбирается доверительный интервал, в который входят значения лучших векторов популяции, после чего случайным образом выбирается лучший вектор из данного интервала и происходит получение вектора мутанта с помощью стратегии DE/current-to- p best/1, где p доверительный интервал с лучшими векторами. В случае варианта стратегии с архивом, на каждой итерации расчета нового вектора для пополнения общей популяции требуется вести архив векторов, которые были заменены в блоке выбора, а также архивы значений для параметров F и CR (S_F и S_{CR} соответственно), также принадлежащих замененным векторам в блоке выбора. При этом стратегия мутации претерпевает небольшие изменения:

$$\text{DE/current to best/1} \quad x_G^{mut} = x_G^i + F(x_G^{best-p} - x_G^i) + F(x_G^{r1} - \tilde{x}_G^{r2}), \quad (3.31)$$

где \tilde{x}_G^{r2} выбирается из объединенных множеств – векторов текущей популяции и архива, а остальные векторы только из текущей популяции.

Как и в предыдущих вариациях DE, адаптация параметров F и CR происходит путем формирования новых значений:

$$F_{G+1}^i = \text{randc}_i(\mu_F, 0.1), \begin{cases} 1, & \text{если } F \geq 1 \\ \text{randc}_i(\mu_F, 0.1), & \text{если } F \leq 0 \end{cases} \quad (3.32)$$

$$CR_{G+1}^i = \text{randn}_i(\mu_{CR}, 0.1), \quad (3.33)$$

Однако важную роль играет именно поиск областей (μ_{CR} и μ_F) для их применения в качестве параметров для получения случайных значений и вычисления F_{G+1}^i и CR_{G+1}^i .

$$\mu_{CR} = (1 - c) \cdot \mu_{CR} + c \cdot \text{сред. арифм}(S_{CR}), \quad (3.34)$$

$$\mu_F = (1 - c) \cdot \mu_F + c \cdot \text{среднее значение Лемера}(S_F), \quad (3.35)$$

$$\text{где среднее значение Лемера}(S_F) = \frac{\sum_{F \in S_F} F^2}{\sum_{F \in S_F} F} \quad (3.36)$$

где: randn – случайное число с учетом нормального распределения, randc – случайное число с учетом распределения Коши. В данной вариации формирование новых параметров происходит в момент перехода метода к новой популяции что значит формирование областей (μ_{CR} и μ_F) для целого поколения.

Несмотря на полностью автоматический поиск параметров, данный метод уступает по скорости работы методам jDE и aDE.

Алгоритм 9: Псевдокод JADE.

Инициализация:

N = размерность задачи; $NP = N \cdot 10$;

$\mu_{CR} = 0.5$; $\mu_F = 0.5$; $A = \emptyset$;

$P_max = 50000$;

$G = 1$;

P_G = инициализация популяции случайными числами;

while (критерий останова не удовлетворен **или** $G \neq P_max$) **do**

best = определить лучший вектор

$S_F = \emptyset$; $S_{CR} = \emptyset$;

for i with each individual x_G^i in P_G **do**

$F_{pool\ G} =$ инициализация $\text{randc}(\mu_F, 0.1)$ для каждого вектора

$CR_{pool\ G} =$ инициализация $\text{randn}(\mu_{CR}, 0.1)$ для каждого вектора

$x_{best,G}^p =$ случайно выбрать вектор из набора лучших векторов

$x_G^{mut} =$ Мутация (DE/current to best/1, $F_{pool\ G}^i, x_G^i, x_{best,G}^p$)

$u_G^i =$ Скрещивание ($CR_{pool\ G}^i, x_G^i, x_G^{mut}$)

// видоизмененная процедура выбора

if $f(x_G^i) \leq f(u_G^i)$

$x_{G+1}^i = x_G^i$

else

$x_{G+1}^i = u_G^i$;

$x_G^i \rightarrow A$;

$CR_{pool\ G}^i \rightarrow S_{CR}$;

$F_{pool\ G}^i \rightarrow S_F$;

end if

end for

удалить случ. вектор из архива A , в случае если $|A| \leq NP$

$\mu_{CR} = (1 - c) \cdot \mu_{CR} + c \cdot \text{сред. арифм}(S_{CR})$,

$\mu_F = (1 - c) \cdot \mu_F + c \cdot \text{среднее значение Лемера}(S_F)$

$G = G + 1$

end while

2.4.4. Модификации внутренних блоков методов дифференциальной эволюции

Стандартные алгоритмы и описание методов дифференциальной эволюции обычно включают общепринятые блоки мутации, скрещивания и выбора, которые выполняются для каждого вектора внутри популяции с постепенной сменой поколений. Однако в момент реализации мало кто отходит от существующих описаний и зачастую провоцирует узкие места, которые отрицательно сказываются на эффективности метода. В качестве одного из таких мест можно обозначить блок мутации.

Алгоритм 10: Мутация

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ. число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ. число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = 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 основе процедуры мутации лежит формирование нового вектора мутанта с помощью случайно выбранных векторов, а также следованием стратегии мутации. Вместе с тем в литературных источниках отсутствует разбор ситуации, где элементы получившегося мутантного вектора выходят за пределы установленных верхних или нижних ограничений.

В случае решения задачи минимизации дефицита мощности, для работы метода с ограничениями дополнительно применяется метод штрафных функций, который многократно повышает расчетное значение целевой функции в случае выхода параметров за пределы, в связи с чем такие ситуации существенно влияют на работу метода DE из-за растущего числа векторов популяции выходящих за пределы ограничений.

Поэтому для полноценной работы метода, а также исключения появления решений, не отвечающих нижним $x_{G,j}^L$ и верхним $x_{G,j}^U$ ограничениям по

переменным, в блок мутации вводится дополнительный этап проверки соответствия получившегося элемента вектора требуемому ограничению. Всего предлагается 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 11: Модификация алгоритма мутации 1

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ. число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ. число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ. число(NP – 1);

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  $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ 
         $x_{G,j}^{mut} = \text{случ. число}(x_{G,j}^L, x_{G,j}^U);$ 
    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 12: Модификация алгоритма мутации 2

```

i – индекс целевого вектора в популяции;
while (r1 == i) do r1 = случ. число(NP – 1);
while (r2 == i или r2 == r1) do r2 = случ. число(NP – 1);
while (r3 == i или r3 == r2 или r3 == r1) do r3 = случ. число(NP – 1);

for j от 0 до N
     $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^{r1} + F(x_{G,j}^{r2} - x_{G,j}^{r3});$ 
    if  $x_{G,j}^{mut} < x_{G,j}^L$ 
         $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^L;$ 
    else if  $x_{G,j}^U < x_{G,j}^{mut}$ 
         $x_{G,j}^{mut} = x_{G,j}^U;$ 
    end if
end for

```

Апробация модификации прошла успешно, результаты работы метода показывали стабильные корректные решения, а итоговая скорость работы метода для задачи минимизации дефицита мощности по сравнению со стандартным блоком мутации показала ускорение на 8%.

2.5. Выводы по главе

В этой главе рассматривалось развитие математических моделей минимизации дефицита мощности, применяемых в программных комплексах для оценки балансовой надежности ЭЭС. Можно заметить, что основная идея – построение моделей в соответствии с транспортной задачей. Каждая из рассмотренных и предложенных моделей строилась для решения задачи поиска минимума дефицита мощности при оптимальном потокораспределении в соответствии с заданными ограничениями и горизонтом планирования.

В качестве исходной модели минимизации дефицита мощности для предлагаемых улучшений и разработки использовалась модель с квадратичными потерями при перетоках мощности, ранее использовавшаяся в программном комплексе ЯНТАРЬ.

Наиболее важным показателем подобных математических моделей является отражение максимального правдоподобия физически корректных процессов, происходящих в ЭЭС. Таким образом, большая часть модификаций, рассматривает повышение адекватности за счет внедрения новых ограничений, в результате чего было предложено дополнительное ограничение на перетоки мощности, запрещающее работу связи в двух направлениях одновременно, что повысило физическую корректность модели.

Также был предложен подход с использованием двух этапов последовательной оптимизации, где на первом этапе с балансовыми ограничениями неравенствами выполняется поиск минимума дефицитов мощности, а на втором этапе оптимизированные параметры нагрузки фиксируются, проводится оптимизация с учетом балансовых ограничений

равенств для суммы квадратов перетоков мощности, что в конечном итоге повышает оптимальное потокораспределение результатов.

Несмотря на решение основных проблем и получение рабочей модели минимизации дефицита мощности с квадратичными потерями при перетоках мощности, также было необходимо сформировать модель с учетом текущих требований. Ввиду того, что в практике управления энергосистемами проводят учет не межзонных связей, а контролируемых сечений, где ограничения пропускной способности рассчитывают для контролируемых сечений в виде максимально и аварийно допустимых перетоков активной мощности, появилась необходимость учета таких контролируемых сечений. На основе исходной модели минимизации дефицита мощности были разработаны модели, учитывающие контролируемые сечения максимально и аварийно допустимых перетоков активной мощности путем внедрения дополнительных ограничений и матрицы сетевых коэффициентов. Корректность всех разработанных и модифицированных моделей подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями.

В этой главе также рассматривались методы оптимизации, которые могут быть использованы для минимизации дефицита мощности задач на основании разработанных моделей. Для решения вопроса применения большого спектра безусловных методов оптимизации к задаче с ограничениями равенствами и неравенствами был использован метод штрафных функций; таким образом, было достигнуто преобразование задачи от формально условной к безусловной. В соответствии с найденными недостатками существующих подходов к минимизации дефицитов мощности методами оптимизации, для исследования применимости к разработанным задачам и эффективности работы были предложены две группы методов, а именно: группа известных градиентных методов и группа методов дифференциальной эволюции.

Были исследованы методы, использующие градиентный спуск и его вариации, а именно, стандартный метод градиентного спуска, метод наискорейшего спуска и метод сопряженных градиентов. Для автоматического уточнения шага и полноценной работы метода наискорейшего спуска и метода

сопряженных градиентов был реализован и применен метод линейного поиска по правилу Армихо. Полученные экспериментальные данные показали, что градиентные методы имеют серьезный недостаток, а именно, частое попадание в локальные минимумы функции, заикливания, недостаточная скорость работы, а также сильное разрастание функции после преобразования методом штрафных функций за счет верхних и нижних ограничений на переменные.

Для получения глобальных результатов и избавления от многих других проблем были проведены анализ и реализация методов дифференциальной эволюции. Методы дифференциальной эволюции позволили снизить количество необходимых ограничений, используемых в методе штрафных функций, а именно, были исключены верхние и нижние ограничения, т.к. метод дифференциальной эволюции имеет внутренние механизмы их учета. Для достижения большей универсальности в рамках изменяющихся моделей, а также количества переменных для разных систем, были реализованы и проанализированы различные подходы к самонастройке метода дифференциальной эволюции. В рамках анализа проверялись методы дифференциальной эволюции, композитной дифференциальной эволюции, самонастраивающейся дифференциальной эволюции, хаотической дифференциальной эволюции, а также адаптивной 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 рамках научно-исследовательской работы были доработаны и предложены модификации проверки мутантных векторов, которые могут быть использованы во всех рассмотренных методах DE и повышают их эффективность с точки зрения скорости до 8% относительно того же метода без применения предложенных модификаций.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЭС

3.1. Общая концепция комплекса программ для оценки балансовой надежности ЭЭС

Существующий подход к расчету балансовой надежности методом Монте-Карло, а также последующий анализ полученных данных и окончательный расчет показателей балансовой надежности требуют большого объема вычислений, проведение которых на сегодняшний момент трудно представить без использования программных средств. Как уже упоминалось в обзорной части диссертации, существуют более 14 программных комплексов, направленных на оценку балансовой надежности ЭЭС. Однако, несмотря на разнообразие комплексов нужно отметить, что часть из них устарела по многим критериям и уже не используется, другая состоит из закрытых коммерческих проектов, в которых оценка балансовой надежности является одной из многих решаемых задач. В том числе существуют комплексы, ставящие в качестве цели – решение задачи снижения экономических затрат при минимизации дефицита мощности, что приводит к получению показателей балансовой надежности, отличных от ПБН полученных при решении задачи МДМ.

Таким образом, работающие в настоящее время программные комплексы не могут обеспечить полноценную оценку балансовой надежности с использованием адекватных математических моделей МДМ, а также моделей с учетом контролируемых сечений, наличие которых продиктовано текущими требованиями к расчетам. Часть рассмотренных комплексов относится к коммерческому закрытому программному обеспечению, что ограничивает возможность их использования, в том числе для научных исследований. Часть комплексов также не учитывает современные тенденции развития программного обеспечения и ограничена устаревшими технологиями. Таким образом, для решения проблем, связанных с существующими программными комплексами для

оценки балансовой надежности ЭЭС, необходимо разработать новый комплекс программ для оценки балансовой надежности, лишенный вышеописанных недостатков и отвечающий современным требованиям и возможностям.

Структура разрабатываемого комплекса оценки балансовой надежности в многом была определена самим процессом расчетов оценки балансовой надежности, и ранее частично была реализована в программном комплексе «ЯНТАРЬ», который алгоритмически поделён на несколько последовательных модулей с происходящими внутри операциями, зависящими от предыдущих. Подход к проектированию архитектуры самого комплекса (Рисунок 3.1), который в последствии получил название «Надежность», включал в себя последовательную декомпозицию всех расчетных и подготовительных процессов с целью создания независимых модулей головной программы, а также выделение дополнительных подпрограмм для обработки ретроспективных данных с последующим формированием графиков нагрузки и коэффициентов аварийности оборудования.

Определение модулей, подпрограмм, бизнес-логики и взаимодействия с данными происходило в соответствии известными архитектурными шаблонами и паттернами (Model-View-ViewModel, Model-View-Controller/Presenter) [72], [103], а их реализация отвечала современным принципам объектно-ориентированного программирования (инкапсуляция, полиморфизм, наследование, абстракция) [72]. Ввиду того, что важным аспектом разработки программного комплекса является возможность замены любого модуля комплекса без внесения существенных изменений в весь проект, заранее были определены избыточные структуры данных и интерфейсы, а наиболее подверженный изменениям модуль головной программы был вынесен как отдельная динамически подключаемая библиотека.

Пользуясь вышеописанным подходом программный комплекс (Рисунок 3.1) был разделен на следующие составляющие:

1. Подпрограмма обработки данных, взятых из журналов с заявками на ремонт элементов электроэнергетической системы, с возможностью формирования конечной информации о выводе оборудования в ремонты за ретроспективный

период, с последующим вычислением аварийности данного оборудования. (Реализована на C#).

2. Подпрограмма, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку необходимой информации для формирования прогнозных графиков нагрузки, используемых в последующих расчетах балансовой надежности электроэнергетических систем. (Реализована на C#).

3. Головная программа, включающая (Реализована на Python 3.8):

3.1. модуль загрузки схем электроэнергетических систем разной сложности с учётом их нагрузок, генераций, направлений контролируемых сечений и входящих в них линий, аварийности каждого элемента системы, графиков ремонтов и характерных графиков нагрузки, а также других инициализирующих и настроечных параметров;

3.2. модуль формирования расчётных состояний модели с помощью различных генераторов случайных чисел;

3.3. динамически подключаемая библиотека блока оптимизации, включающая в себя программную реализацию математических моделей и методов оптимизации, а также опциями параллельной обработки (Реализована на C++);

3.4. модуль статистической обработки полученных данных и последующего анализа с целью получения показателей балансовой надёжности;

3.5. модуль вывода результирующей информации в формате текстовых файлов и логов.

Подводя итог, головная программа включает в себя модули загрузки схем, формирования расчетных состояний, расчета показателей балансовой надежности и вывод результатов оценки БН. Все входящие модули требуют малый объем вычислительных и расчетных ресурсов (либо незначительно влияют на скорость полного цикла расчетов) поэтому были реализованы на языке программирования Python. Преимущества разработки основной части комплекса на Python в его универсальности, он может быть задействован как в Desktop версии ПО в формате исполняемого файла, так и в Web представлении в качестве backend составляющей без необходимости внесения дополнительных масштабных изменений;

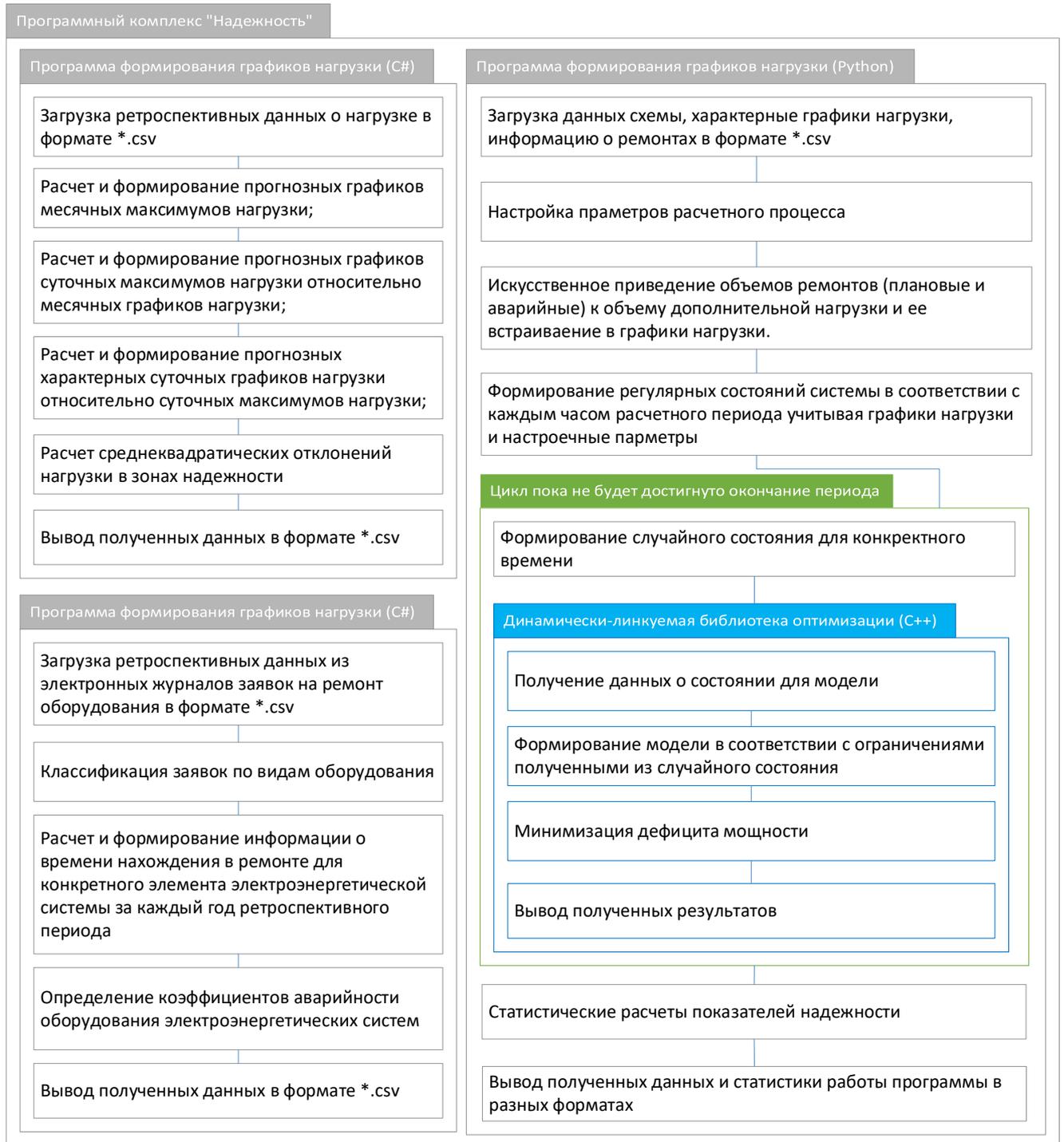


Рисунок 3.1 – Структура программного комплекса для оценки балансовой надежности ЭЭС

Формирование состояний ЭЭС было выделено в отдельный модуль, где сразу формируется пакет из нескольких состояний системы, которые затем посылаются в оптимизационный модуль для расчета дефицита мощности каждого из них. Такой подход обеспечивает возможность параллельных расчетов каждого состояния, на случай если такая опция будет включена.

Расчетная часть выполняющая точные и ресурсозатратные вычисления, а именно динамически подключаемая библиотека блока оптимизации реализуется на C++ с применением технологии Boost::Python для обеспечения работы библиотеки с основной частью разработанной на Python 3.8, а также стандарта распараллеливания OpenMP. Такой подход позволяет формировать дополнительные динамически подключаемые библиотеки с применением различных технологий, а также численных методов и математических моделей, без необходимости внесения серьезных изменений в общую часть проекта комплекса программ.

3.2. Программная реализация динамической библиотеки блока оптимизации

Сложная структура комплекса и реализация его частей на разных языках программирования обусловлена поставленными целями с учетом существующих ограничений и требований, которые могут быть достигнуты с помощью разных языков программирования. Головная программа комплекса на данный момент имеет реализацию на языке программирования Python 3.8 что обусловлено расширенными возможностями ее применения как в Desktop, так и в Web версии. Не смотря на удобство разработки и удобство встраивания язык программирования Python 3.8 имеет большие допущения в рамках расчетов с числами с плавающей запятой, а также сниженную скорость работы по сравнению с языком программирования C++.

Необходимость замены разных средств оптимизации, наличие допущений в расчетах на Python, а также их не высокая скорость стали причиной формирования самостоятельного модуля оптимизации, реализуемого на C++. Для полноценной работы программного комплекса было необходимо решить проблему передачи данных между модулем оптимизации и головной программой. Требовалась двусторонняя передача данных, а именно загрузка набора сформированных случайных состояний в модуль оптимизации и выгрузка полученных решений

(значений дефицитов мощности), в том числе загрузки элементов (генерирующих агрегатов в зонах надежности и линий электропередачи в межзонных связях). В качестве вариантов взаимодействия основной программы и модуля оптимизации рассматривались следующие:

- Текстовые файлы. Минусы данного подхода: повышенная нагрузка на средства хранения данных их физический износ; низкая скорость загрузки и выгрузки; наличие прослойки из дополнительного файла; возможные ошибки записи и чтения; возможная потеря точности при конвертации данных; невозможность мониторинга работы программы;

- Бинарные файлы. Плюсы: высокая скорость загрузки/выгрузки. Минусы: повышенная нагрузка на средства хранения данных их физический износ; наличие прослойки из дополнительного файла; возможные ошибки записи и чтения; возможная потеря точности при конвертации данных; невозможность мониторинга работы программы

- Перехват данных в адресном пространстве оперативной памяти. Плюсы: высокая скорость загрузки/выгрузки; отсутствие прослойки из дополнительного файла; Минусы: сложность реализации подхода; необходимость в самостоятельном преобразовании типов данных разных языков;

- Формирование динамически подключаемой библиотеки. Плюсы: стандартизированная процедура конвертации типов данных, возможность мониторинга состояния работы библиотеки извне; отсутствие прослойки из дополнительного файла; Минусы: сложность технологии; необходимость применения внешних библиотек.

Для удобства разработки и отладки работы разрабатываемого программного обеспечения было решено в первую очередь реализовать отдельную подпрограмму с возможностью загрузки данных из файла. Данная программа отвечает минимальным требованиям и позволяет загружать файлы с данными об ограничениях и схемах ЭЭС. Далее после подробного анализа представленных вариантов была обоснована необходимость формирования отдельной динамически

подключаемой библиотеки для модуля оптимизации. Тем не менее предложенный подход включал в себя разные варианты его реализации [104], где доступные для реализации технологии были опробованы, а именно:

1. Технология **ctypes** — это внешняя библиотека функций для Python. Она предоставляет набор инструментов низкого уровня для загрузки общих библиотек и процесса преобразования представления объектов в памяти в формат данных, пригодный для хранения или их передачи, совместимых с C, а также позволяет вызывать функции в библиотеках DLL или разделяемых библиотеках. Его можно использовать для обертывания этих библиотек в чистый Python. Одним из минусов данного подхода является необходимость описывать в Python, что C функции возвращают и принимают в качестве аргументов. Реализация библиотеки прошла успешно, однако данная технология может работать только с C функциями, что требует дополнительной обвязки C методов классов C++, что увеличивает объем кода и усложняет его читаемость, в связи с чем было решено отказаться от данной технологии.

2. Технология **CFFI** — это интерфейс внешних функций C для Python, он использует более автоматизированный подход для связывания с Python. CFFI предлагает несколько способов построения и использования связывания с Python. Есть два разных варианта: ABI и API; в режиме API используется компилятор C для создания полного модуля Python, тогда как в режиме ABI загружается общая библиотека и взаимодействует с ней напрямую. Без запуска компилятора получение правильных структур и параметров чревато ошибками. Документация настоятельно рекомендует использовать режим API, что и было сделано, реализация так же требовала наличие обвязки C методов классов C++, в дополнение создавалась еще одна динамическая библиотека которая использует исходную, а сборка библиотек требует прописывания всех заголовочных файлов и библиотек, что снижает удобство и повышает вероятность ошибок при сборке, поэтому от применения данной технологии также было решено отказаться.

3. Технология **PyBind11** использует совершенно другой подход к созданию привязок Python. Помимо смещения акцента с C на C++, он также

использует C++ для спецификации и сборки модуля, что позволяет использовать преимущества инструментов метапрограммирования в C++. Как и CFFI, привязки Python, сгенерированные из PyBind11, представляют собой полноценный модуль Python, который можно импортировать и использовать напрямую. PyBind11 создан по образцу библиотеки Boost::Python и имеет аналогичный интерфейс. Однако он ограничивает его использование до C++ 11 и новее, что стало серьезным ограничением в момент сборки, т.к. динамически подключаемая библиотека блока оптимизации использует стандарт C++ 20, дальнейшее применение технологии было невозможно.

4. Технология **Cython** к созданию привязок Python использует язык, подобный Python, для определения привязок, а затем генерирует код C или C++, который можно скомпилировать в модуль, однако необходимость генерации дополнительного кода описания интерфейсов и файлов также стали причиной отказа от технологии.

5. Технология **PyBindGen** создает привязки Python для C или C++ и написан на Python. Он нацелен на создание читаемого кода C или C++, что должно упростить отладку. К сожалению документация данной технологии описывает взаимодействие с Python версии 3.4, когда разрабатываемая головная программа использует версию 3.8, что послужило причиной отказа от использования этой технологии и поиска другой.

6. Технология **SIP** — это набор инструментов для связывания с Python, разработанный для проекта PyQt. SIP также используется проектом wxPython для создания привязок. Он имеет инструмент генерации кода и дополнительный модуль Python, который предоставляет функции поддержки для сгенерированного кода, однако с текущей версией стандарта C++ использоваться не может.

7. Технология **Shiboken** — это инструмент для создания привязок Python, разработанный для проекта PySide, связанного с Qt. Хотя он был разработан как инструмент для проекта Qt, в документации указано, что он не специфичен ни для Qt, ни для PySide и может использоваться для других проектов.

8. Технология **SWIG** отличается от любого из перечисленных здесь инструментов. Это общий инструмент, используемый для создания привязок к программам C и C++ для многих других языков, а не только для Python. Эта возможность создавать привязки для разных языков может оказаться весьма полезной в некоторых проектах, однако универсальность подводит его с точки зрения дополнительных оберток и описаний методов.

9. Технология **Boost::Python** имеет интерфейс, похожий на PyBind11, который был обозначен выше. Boost::Python полностью написан на C++ и поддерживает большинство, если не все версии C++ на большинстве платформ, а также имеет множество дополнений в других областях разработки. Данная технология, как и многие предыдущие требует обертки C++ классов, описанных на Python, однако работать с Boost.Python проще чем с предыдущими кандидатами, обёртка любой функции сводится к одной строке, которая выглядит как аналогичное объявление метода в Python, сборка запуск и работа библиотек может быть осуществлена стандартными средствами без необходимости дополнительных описаний. Также в виду работоспособности данной технологии с нужными стандартами C++ и Python данный способ взаимодействия двух языков программирования был выбран для дальнейшего использования в программном комплексе для оценки балансовой надежности.

Таким образом, в ходе работы были рассмотрены все вышеописанные варианты, однако большая часть из них была отвергнута в связи с отсутствием поддержки необходимой версии Python 3.8, стандарта C++, давней датой обновления самих проектов и/или отсутствием подробной документации и необходимостью внесения дополнительных оберток для написанных методов на C++. Далее в качестве основной технологии была выбрана упаковка библиотеки с помощью Boost::Python имеющая обширную документацию, поддержку новых, современных версий C++ и Python. Большая часть функций, реализованных в программе модуля оптимизации была перенесена в динамически подключаемую библиотеку которая в настоящий момент позволяет проводить следующие операции:

- 1) Доступ к методам инициализации и преобразования типов данных из формата Python в формат C++;
- 2) Формирование программного представления заданных математических моделей, а именно ограничений с учетом поступивших данных о случайных состояниях.
- 3) Множественные запуски методов оптимизации для проведения поиска первого решения и его последующего использования в качестве одной из начальных точек для последующих поисков;
- 4) Поиск решений методом сопряженных градиентов или методом наискорейшего спуска для математической модели с одноэтапной оптимизацией в зависимости от выбранных опций;
- 5) Поиск решений вариациями методов дифференциальной эволюции (ADE, jDE, JADE) в зависимости от выбранных опций;
- 6) Включение и выключение режима параллельных вычислений (для состояний или для методов в зависимости от выбранных опций);
- 7) Обратная конвертация полученных решений в формат данных Python и отправка результатов в основной блок программы.

3.2.1. Структура строения связанных и наследуемых классов динамической библиотеки блока оптимизации

Изначально для проверки работоспособности запрограммированных структур, классов и методов была реализована тестовая программа, которая в последствии была также представлена как динамически подключаемая библиотека. Тестовая программа и библиотека предназначались для считывания данных о схеме системы, составлении их зависимостей и взаимосвязей, формировании набора ограничений, матрицы инцидентности и начальной точки, которые в последствии должны быть оптимизированы в соответствии с заданной математической моделью, после чего выводился результат. Для корректной и более гибкой разработки был применен подход в соответствии с парадигмой объектно-

ориентированного программирования (ООП), подразумевающего организацию программного кода, ориентируясь на данные и объекты, а не на функции и логические структуры.

Основа построения этой программы прорабатывалась для возможности ее использования с различными математическими моделями и методами оптимизации, которые в последствии могли быть изменены или расширены. Для достижения поставленной задачи была предложена архитектура, выделяющая два направления – математические модели и методы оптимизации. В свою очередь, требовалось, чтобы методы оптимизации могли принять любой вариант модели, без необходимости изменения методов оптимизации, поэтому к моделям был применен приём выделения абстракции, которая содержит в себе все необходимые и общие свойства, параметры и методы, которые могут содержаться в любой модели.

Абстрактные классы используются в качестве обобщенных концепций, на основе которых можно создавать более конкретные производные классы. Нельзя создать объект типа абстрактного класса. Однако можно использовать указатели и ссылки на абстрактные типы классов. Абстрактный класс создается путем объявления по крайней мере одной чистой виртуальной функции члена. Это виртуальная функция, объявленная с помощью синтаксиса чистого описателя «=0». Классы, производные от абстрактного класса, должны реализовывать чисто виртуальную функцию; в противном случае они также будут абстрактными [72], [105]. Такой подход обеспечивает возможность наследования моделей от абстрактного класса и последующую реализацию необходимых конструкторов, деструкторов и методов, которыми сможет воспользоваться решатель (методы оптимизации). Очевидно, что выделение абстракции, в свою очередь, может привести к избыточности базового класса, однако в данном случае это необходимо.

3.2.2. Программная реализация предлагаемых моделей МДМ

Общая структура динамически подключаемой библиотеки и первоначальной программы была сформирована в соответствии с ООП, где должна быть выделена каждая сущность и описана в классе (чертеж, шаблон сущности), где также представлены свои задачи и методы для их решения и взаимодействия с другими сущностями классами и структурами. Таким образом, для программной реализации разработанных моделей МДМ были сформированы дополнительные классы и структуры:

`Struct Point` – структура решения/точки включающая в себя набор оптимизируемых параметров, в том числе информацию об их количестве, её размере, значении целевой функции для текущего решения, первую и вторую нормы градиента с учетом текущего решения, значение градиента и начальное положение решения/точки на момент запуска оптимизации;

`Struct ConstrainsUpLowB` – структура ограничений неравенств, которая включает в себя набор значений характеризующих верхние и нижние ограничения установленные для набора оптимизируемых параметров;

`Struct ConstrainsEqNonEq` – структура ограничений равенств, которая включает в себя матрицу с информацией определяющей возможность использования того или иного оптимизируемого параметра в балансовых ограничениях.

Абстрактный базовый класс `ProblemB` является родительским классом для всех наследующих его моделей, которые могут быть решены методами оптимизации, в том числе модели МДМ. Как следует из определения абстрактного класса: такой подход имеет преимущество – нет необходимости формировать множество одинаковых классов, реализующих методы оптимизации под каждую новую модель, что могло бы повлечь за собой множество ошибок после незначительных исправлений классов самих методов оптимизации, т.к. изменения должны быть внесены для каждого класса. Таким образом, была установлена унификация моделей по базовому классу, и все объекты моделей, которые будут

унаследованы от абстрактного базового класса, реализующие математические модели могут быть использованы в методах оптимизации путем их обозначения базовым классом. Например, *ProblemB * prob = new ModelQuad(args);*.

В свою очередь, базовый класс включает в себя все вышеописанные структуры (решения/точки, ограничений неравенств, ограничений равенств), которые позволяют корректно использовать его потомков (модели МДМ) в методах оптимизации. Абстракция также реализует предварительно настроенные алгоритмы наполнения данных структур исходя из выбранной модели и полученных данных, а часть методов абстрактного класса переопределена наследующимися методами дочерних классов. В качестве наследуемых дочерних классов были реализованы классы моделей МДМ с квадратичными потерями и контролируемыми сечениями.

Общая программная реализация классов и структур базового класса математических моделей, а также моделей МДМ в динамически подключаемой библиотеке, которая в том числе отвечает за их формирование, наполнение и получение значений целевых функций представлена на (рис. 3.2) – диаграммы классов UML 2.5.1. Unified Modeling Language – унифицированный язык моделирования и графического описания для объектного моделирования в области разработки программного обеспечения, для моделирования бизнес-процессов, системного проектирования и отображения организационных структур.

На рисунке представлена только первая часть динамически подключаемой библиотеки блока оптимизации, которая включает в себя информацию о моделях МДМ. Красным контуром выделен абстрактный базовый класс *ProblemB*, к которому идут пустотелые стрелки от выделенных красным контуром наследуемых классов *PPowerShortage_penalty* и *PPowerShortageCut_penalty* отражающие сущность моделей МДМ с квадратичными потерями мощности на перетоках мощности и модели с учетом контролируемых сечений.

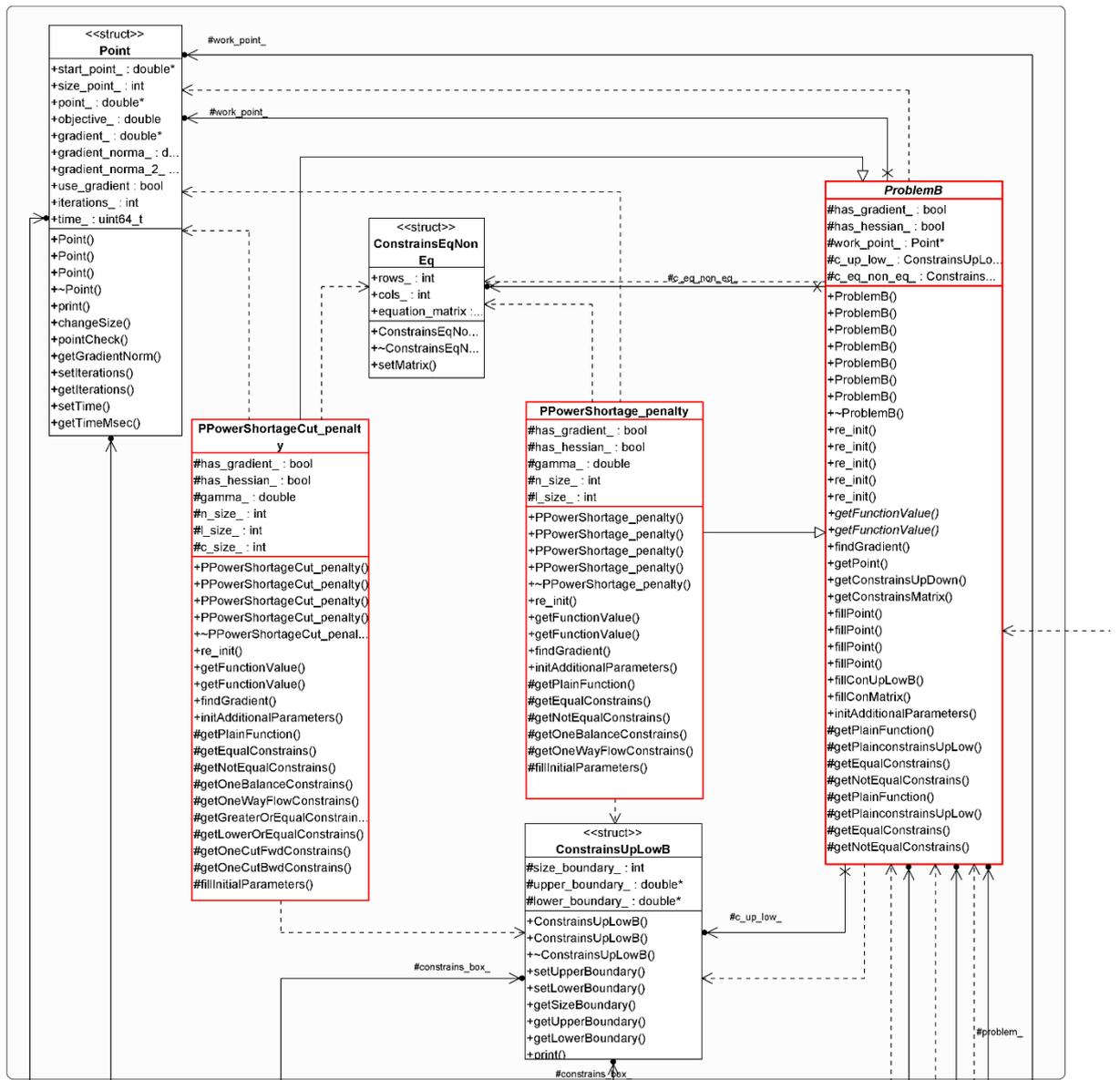


Рисунок 3.2 – Диаграмма классов UML 2.5.1, графическое описание реализации математических моделей МДМ в динамически подключаемой библиотеке блока ОПТИМИЗАЦИИ

3.2.3. Программная реализация предлагаемых методов оптимизации

Реализация классов, отвечающих за методы оптимизации также проводилась с использованием подходов 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 математические модели, унаследованные от базового класса моделей.

Вторая часть общей программной реализации классов методов оптимизации в динамически подключаемой библиотеке представлена на (рис. 3.3) – диаграммой классов UML 2.5.1, где реализация включает в себя также группу градиентных методов, в том числе *FletcherReeves* и класс методов дифференциальной эволюции *DifferentialEvolution*. Для снижения общего объёма кода и возможности повторного его использования, без необходимости формирования шаблонных функций (*template*) блоки мутации, скрещивания и выбора дифференциальной эволюции были реализованы в единственном классе, где любой из реализованных методов может быть выбран из списка перечислений (*enum*). Также в данном классе были сформированы методы, которые в зависимости от настроечного параметра перечислений (*enum*) включали необходимые стратегии мутации.

Однако для реализации параллельных стратегий в рамках метода дифференциальной эволюции был сформирован отдельный класс, частично повторяющий структуру оригинального класса. Основное отличие данного класса *CPUDifferentialEvolution* – наличие *mutex* переменных, ответственных за синхронизацию потоков, а также измененная реализация некоторых методов и функций, позволяющих запускать распараллеленную версию методов.

Работа метода дифференциальной эволюции невозможна без использования генераторов случайных чисел, в данной реализации используется класс *RandSingleton*, включающий в себя несколько разных методов генерации случайных чисел в том числе генератор псевдослучайных чисел Mersenne Twister (C++, *std::mt19937*), с учетом нормального распределения и с учетом распределения Коши.

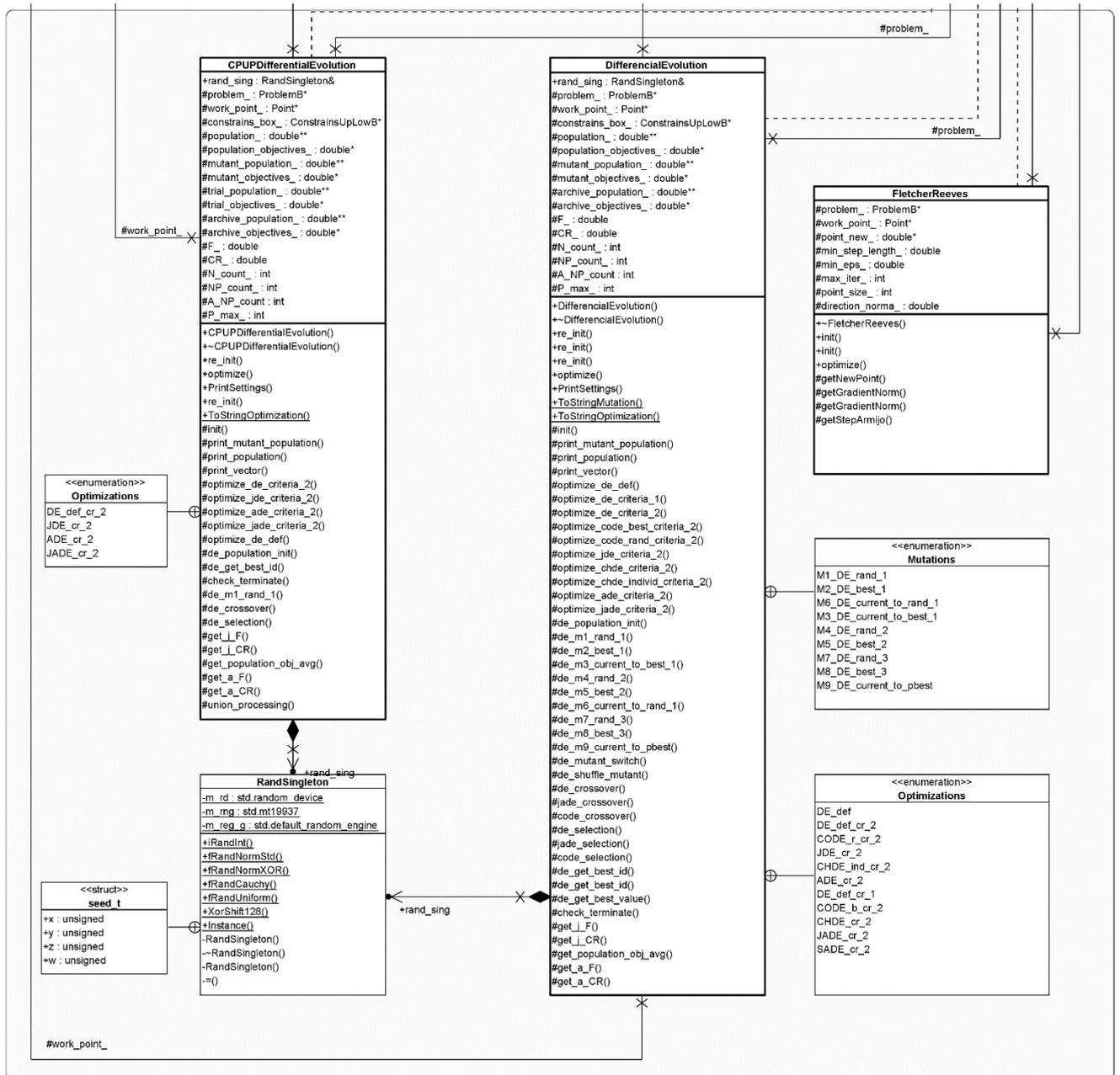


Рисунок 3.3 – Диаграмма классов UML 2.5.1, продолжение графического описания реализации методов оптимизации в динамически подключаемой библиотеке блока оптимизации

К классу RandSingleton был применен паттерн проектирования Singleton, который позволяет создать объект класса только один раз, таким образом, был заблокирован вариант множественных инициализаций генераторов случайных чисел, а также быстрый доступ к методам генерации псевдослучайных чисел. Тем не менее проведенные исследования производительности ПО и используемых

ресурсов показали наибольшую просадку по времени использования именно функции `std::mersenne_twister_engine` что можно увидеть на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Результаты тестирования первоначальной программы блока оптимизации на наличие утечек памяти и время исполнения отдельных операций

Таким образом, представленная программная реализация динамически подключаемой библиотеки является завершённой, а реализация метода штрафных функций уже учитывается и закодирована в наследуемых классах моделей МДМ.

3.2.4. Программная реализация технологий распараллеливания для метода Дифференциальной Эволюции

Метод дифференциальной эволюции представляет собой итерационный процесс создания новых, улучшенных поколений (наборов решений) с применением мутаций, скрещивания и выбора. Несмотря на то, что метод является итерационным, DE можно считать одним из наиболее податливых к распараллеливанию численных методов.

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 к чтению 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) и реализации стандартов языка C++ 11/17/20 (`std::Thread`).

В первом случае применялся стандарт OpenMP, который предполагает собой использование `#pragma` директив компилятора. По этому для достижения параллельности перед регионом цикла, относящегося к выполнению операций мутации скрещивания и выбора, была обособлена директива компилятора «`#pragma omp parallel for shared(F_, CR_population_,mutant_population_)`». Предложенное решение объявляет, что следующий за директивой цикл будет разделен на количество нитей, определенное автоматически самой системой, либо воспользуется подсказкой пользователя – объявленным значением «`omp_set_num_threads(n_threads);`», где `n_threads` – максимальное количество нитей, которое будет выделяться системой для решения задачи. Также примененная директива содержит информацию (пометка `shared`) о переменных, которые будут доступны для доступа из потоков с использованием внутренних синхронизаций.

Во втором случае использовался более нативный подход к реализации многопоточных приложений – `std::Thread`, а также механизм синхронизации работы потоков `std::mutex`. Суть подхода остается прежней, формируется несколько потоков, которые разделяют между собой вектора популяции в равных частях, для которых будут выполняться блоки метода DE, а именно мутация, скрещивание и выбор. Ввиду того, что в момент работы блока мутации в соответствии с формулой (2.33) происходит обращение к разным векторам популяции, а также ввиду издержек реализации – к общему списку, хранящему вектора мутаций. Для разграничения доступа к единым ресурсам, применяется практика использования блокировки ресурса в определенном потоке с помощью механизма `std::mutex` и функции объекта синхронизации `lock`. Во время работы и

обращений потоков к ресурсам, потоки будут проверять является ли ресурс заблокированным и в случае блокировки приостанавливать свою работу до момента разблокировки его другим потоком, как только необходимый объект будет разблокирован и доступен потоку, происходит блокировка данного ресурса или объекта для текущего потока. Работа `std::mutex` регламентирована методами работы планировщика заданий в операционной системе и выполняется автоматически. То же самое касается блоков скрещивания и выбора, однако для более эффективного использования ресурсов и снижения количества блокировок общих ресурсов единый цикл, предназначенный для работы всех трех блоков, разделяется на 3 разных цикла, для каждого блока отдельно, которые выполняются последовательно, т.е. в первую очередь в цикле происходит процедура мутации для всех целевых векторов, далее работает цикл, в котором проводится скрещивание, после чего цикл выбора.

Подходы, выбранные в качестве способов распараллеливания методы дифференциальной эволюции, позволили сократить время работы метода на 30% по сравнению с его однопоточной версией. Оба подхода являются перспективными для дальнейшего развития и настройки параллельности DE. Так OpenMP позволяет в полной мере воспользоваться большими мощностями, включая возможность работы метода на любой многопоточной или многопроцессорной системе без необходимости дополнительной настройки, а нативный подход позволяет более тонко настроить и реализовать механизмы распараллеливания, в том числе сменить способы синхронизации и поменять сам алгоритм распараллеливания в целом.

3.3. Выводы по главе

В представленной главе рассматривался комплекс программ для оценки балансовой надежности ЭЭС, его общая концепция и программная реализация. Данный комплекс программ был разделен на несколько подпрограмм подготовки данных и головную программу, отвечающую за внутренние вычисления и определение показателей балансовой надежности. Подготовительные

подпрограммы предполагают обработку данных и формирование конечной информации о выводе оборудования в ремонты за ретроспективный период, с последующим вычислением аварийности данного оборудования, а также формирования прогнозных графиков нагрузки, используемых в последующих расчетах балансовой надежности электроэнергетических систем. Данные подпрограммы были реализованы на языке программирования C#.

Главная программа оценки балансовой надежности, реализована на языке программирования Python 3.8. В главе представлена программная реализация динамически подключаемой библиотеки блока оптимизации, написанная на языке программирования C++. Для взаимодействия головной программы и библиотеки блока оптимизации, написанных на разных языках программирования, были реализованы и проанализированы разные технологии взаимодействия. Разработанная библиотека блока оптимизации реализована с использованием технологии маршаллинга Boost::Python.

Особое внимание было уделено принципам разработки тестовой программы и динамически подключаемой библиотеки блока оптимизации. Основной подход заключался в использовании парадигмы объектно-ориентированного программирования и принципов наследования для достижения универсальности реализованных классов моделей минимизации дефицита мощности. Таким образом, в динамически подключаемой библиотеке были реализованы служебные структуры, необходимые для хранения и обработки временных данных, а также абстрактный базовый класс модели, от которого в последующем можно унаследовать дочерние классы с тонкой настройкой под конкретную модель минимизации дефицита мощности. В рамках работы реализованы несколько дочерних классов моделей минимизации дефицита мощности, в том числе с квадратичными потерями при перетоках мощности и контролируемыми сечениями. Подход с использованием абстрактного класса моделей обеспечивает работоспособность методов оптимизации с любой наследуемой моделью, т.к. при наследовании требуется следовать строгим правилам переопределения всех необходимых для работы данной модели внутренних методов класса.

Также были программно реализованы методы оптимизации в виде классов с учетом дополнительных перечислений и структур, необходимых для их работы. Для генерации псевдослучайных чисел с помощью стандартной библиотеки «random» был реализован Singleton класс, фактическая реализация которого может использовать методы формирования случайных чисел с учетом нормального распределения, распределения Коши, Mersenne Twister. Общая идея методов оптимизации заключается в получении объекта модели с сигнатурой абстрактного класса и настроечных параметров, остальная логика работы инкапсулирована, а результат можно получить путем вызова метода `optimize()` с включенным или выключенным параметром вывода промежуточных данных о ходе оптимизации. Для повышения вычислительной эффективности методов оптимизации была применена технология распараллеливания метода дифференциальной эволюции с использованием стандарта OpenMP.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ МИНИМИЗАЦИИ ДЕФИЦИТА МОЩНОСТИ

4.1. Тестовые схемы для проведения численных экспериментов работоспособности библиотеки блока оптимизации

Экспериментальные расчеты проводились для систем различной конфигурации с разными входными параметрами. В качестве тестируемых, использовались системы с 3-я (ТС₁, ТС₂), 7-ю (ТС₂, ТС₃) и 24-я (ТС₅) зонами надежности. Системы моделируются с помощью двух разных моделей минимизации дефицита мощности – с квадратичными потерями МДМ₃ и ее модифицированной версии с контролируемыми сечениями МДМ₄.

На рисунке 4.1 представлены две схемы с тремя зонами надежности, где для ТС₁, С – обозначают связи в которые входят три ЛЭП, а для ТС₂ С – контролируемые сечения в которых рассматриваются шесть ЛЭП. Параметры генерации (x) и нагрузки (y), представленные на рисунке, являются примером обозначения.

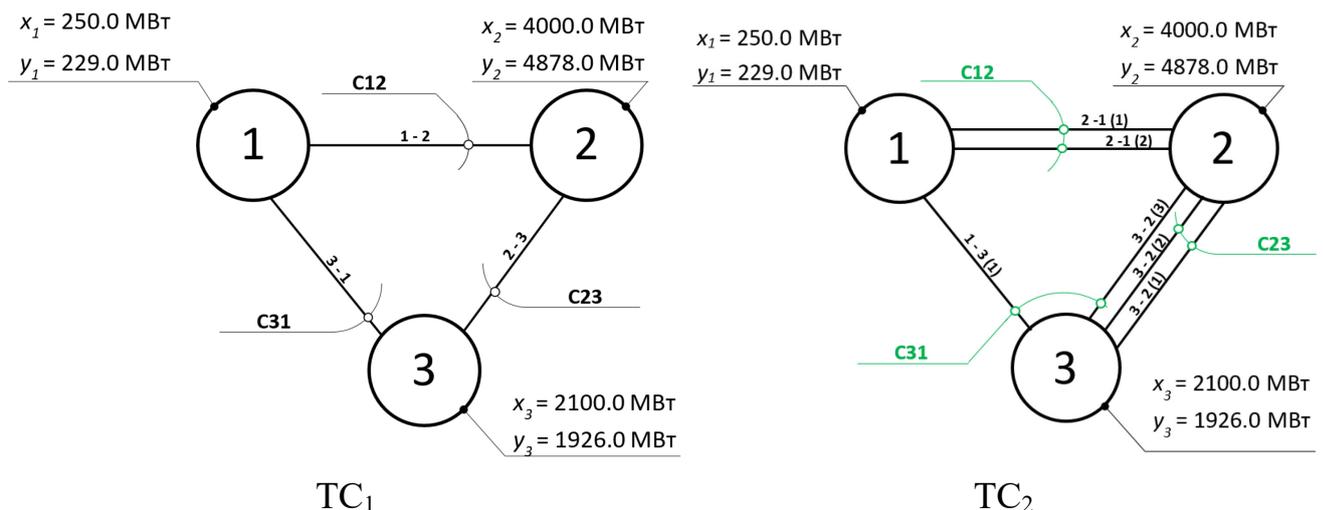


Рисунок 4.1 – Схемы анализируемых систем ТС₁ и ТС₂

Также необходимо обозначить, что моделирование ТС₁ представляется возможным с помощью моделей МДМ₃ и МДМ₄ и предполагает оптимизацию 12 неизвестных. В данном случае связи могут быть так же обозначены как

контролируемые сечения, поэтому расчет может проводиться с помощью двух моделей МДМ. Для оптимизации системы в соответствии со схемой ТС₂ необходимо использовать только модель МДМ₄, т.к. в данном случае обозначены контролируемые сечения, а количество оптимизируемых переменных выросло до 18-ти.

На рисунке 4.2 представлена схема ЭЭС с семью зонами надежности, данная схема ранее рассматривалась в [10], [12], [14], [41], [43]. Моделирование данной системы возможно с помощью моделей МДМ₃ и МДМ₄ в случае, если каждая связь будет представлена своим контролируемым сечением. Таким образом, для данной схемы предполагается оптимизация 28 неизвестных.

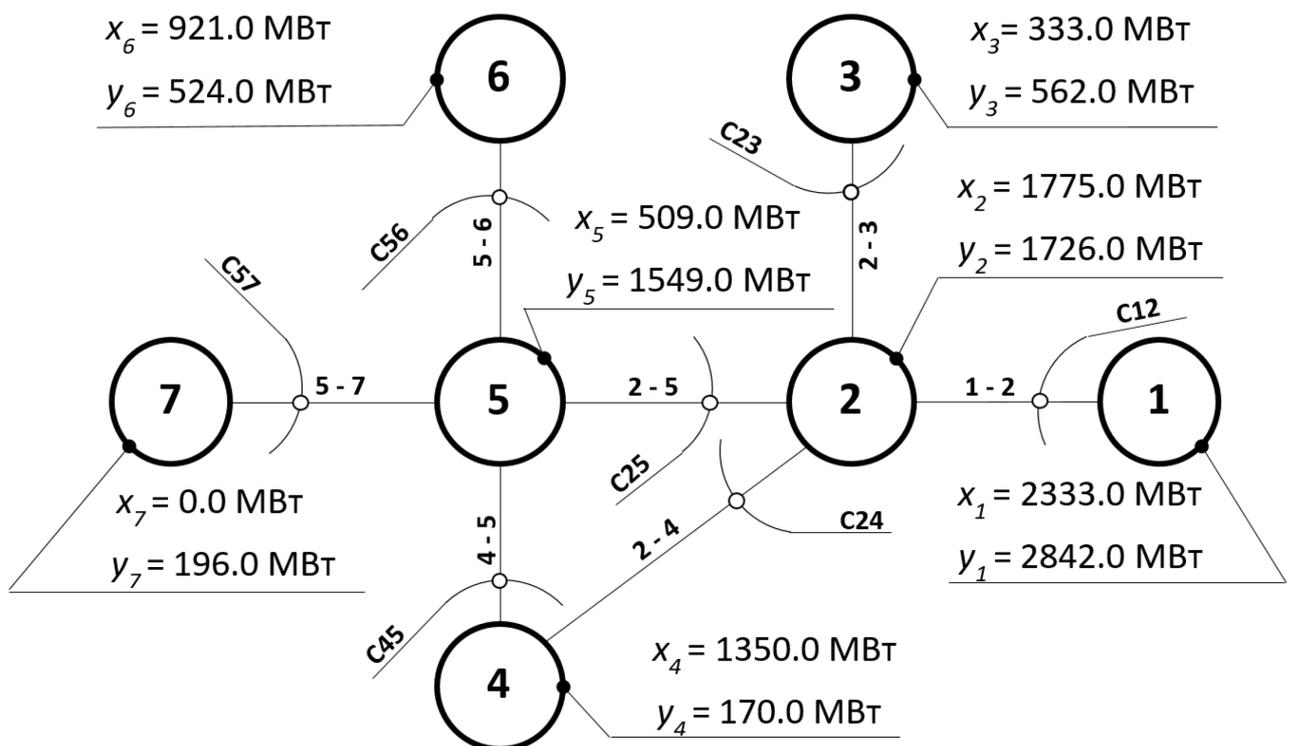


Рисунок 4.2 – Схема анализируемой системы ТС₃ состоящая из семи зон надежности и семи межзонных связей

Схема с семью зонами надежности также была представлена с учетом контролируемых сечений в которые входили несколько линий электропередачи, как это было сделано, например, для схемы ТС₂. Наличие таких схем необходимо

для проведения исследований модели МДМ₄ и ее надёжность в условиях, приближенных к реальным схемам.

На рисунке 4.3 изображена схема системы ТС₄, которая может быть смоделирована с помощью МДМ₄, где количество параметров, которые необходимо оптимизировать составляет 28 неизвестных. Тем не менее, данная работа, в том числе направлена на исследование адекватности представленных моделей МДМ₃ и МДМ₄ на схемах с большим числом зон надёжности и линий электропередачи относительно тестовых схем. Поэтому для анализа работы моделей и методов, а также определения их эффективности с точки зрения точности и скорости решения была использована система, состоящая из 24 зон надёжности и 38 линий электропередачи.

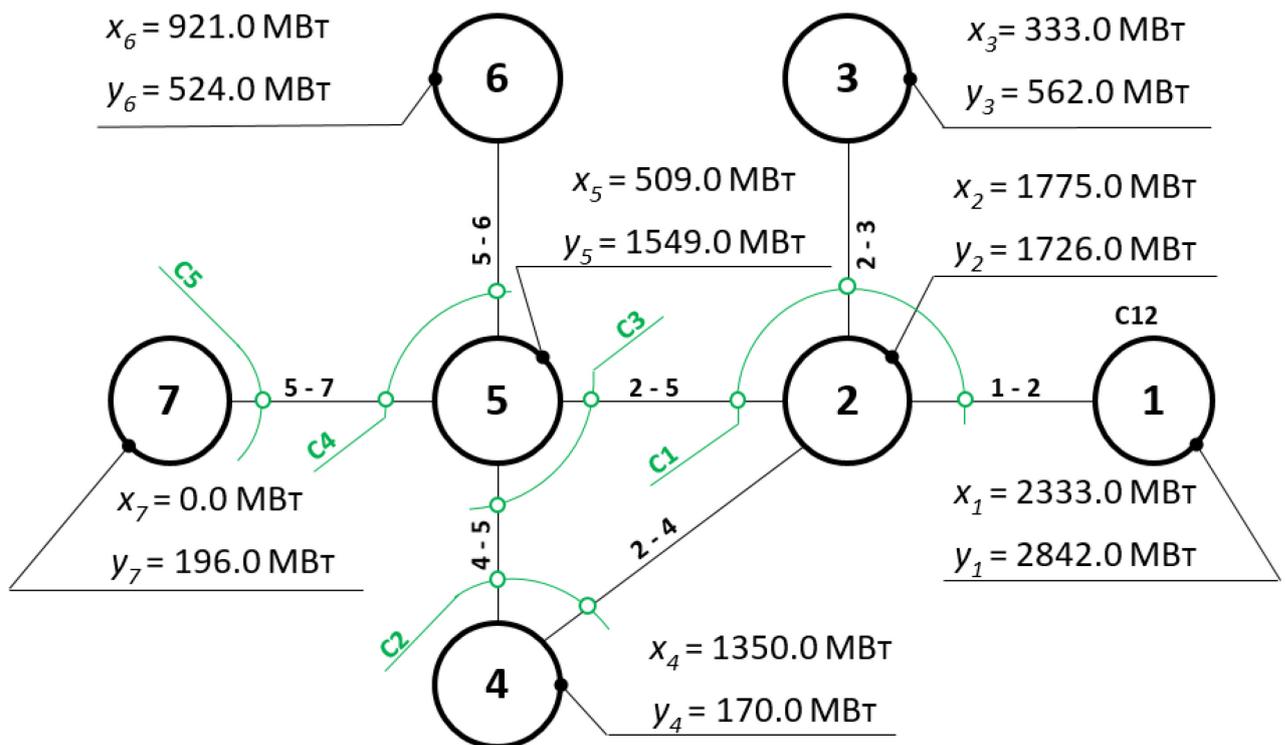


Рисунок 4.3 – Схема анализируемой системы ТС₄ состоящая из семи зон надёжности и семью межзональными связями, образующими контролируемые сечения

Таким образом проверялась как модель с квадратичными потерями мощности при её передаче МДМ₃, так и модель, учитывающая контролируемые

сечения МДМ₄, в данном случае проводилась оптимизация 124 неизвестных [40]; схема представлена на рисунке 4.4.

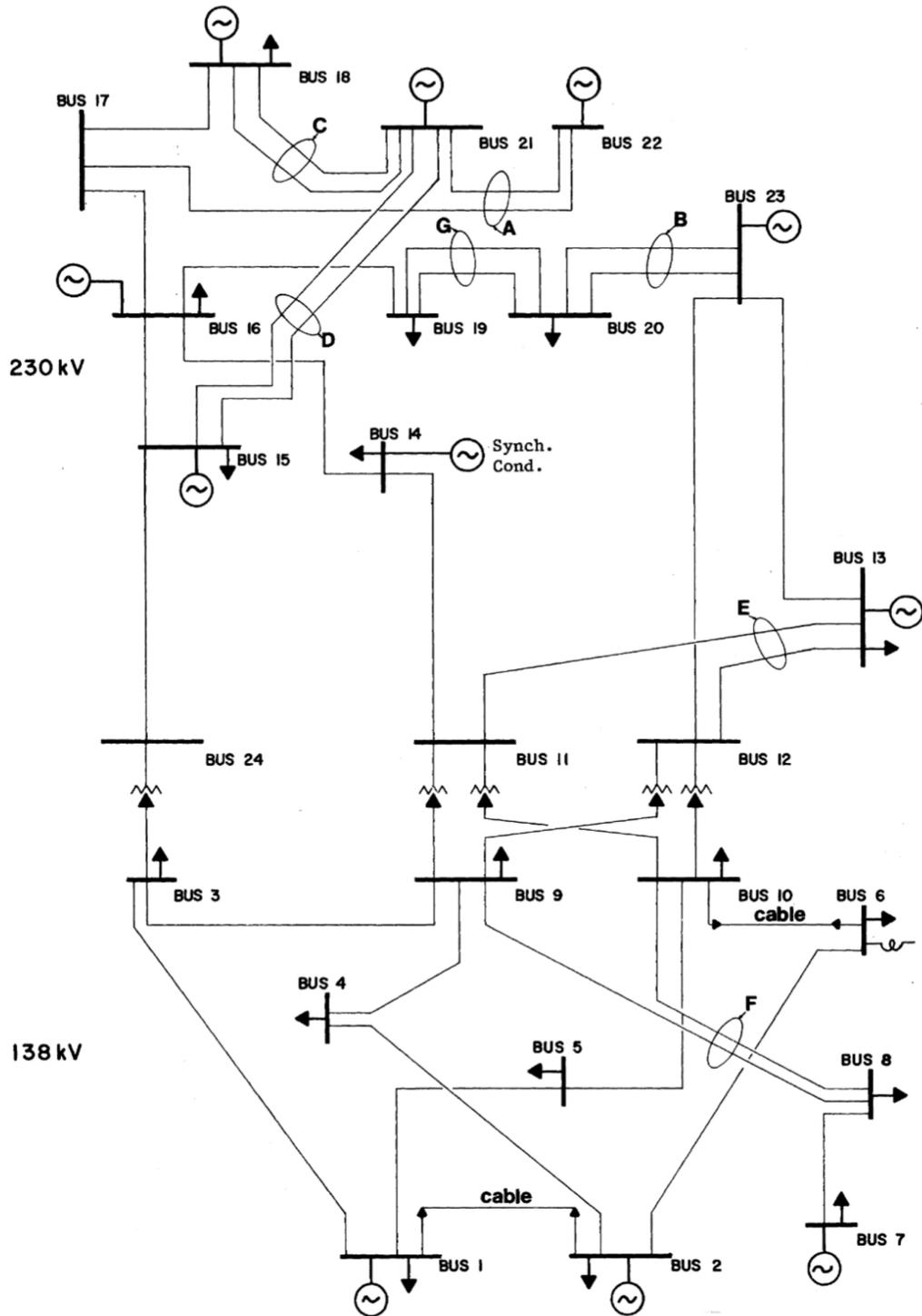


Рисунок 4.4 – Схема анализируемых систем TC₅ с 24я зонами надежности и 38 ЛЭП, IEEE RTS-96.

4.2. Численные эксперименты определения минимумов дефицита мощности для моделей МДМ градиентными методами

Построение и реализация подпрограммы и динамической библиотеки оптимизации, включающая в себя процедуры формирования моделей и работы методов, была проведена в среде сборки MinGW w64 6.0 [x86_64-8.1.0-posix-seh-rt_v6-rev0], с использованием компилятора GCC [version 8.1.0] (стандарт C++ 20), флаги компилятора «-O2 -march=corei7 -mfpmath=sse -ftree-vectorizer-verbose=1», библиотека была настроена в соответствии с технологией Boost::Python 3.8. Все этапы экспериментальных исследований проводились на ПК со следующими техническими параметрами: Intel(R) Core i7-8700K @ 3.70GHz, boost 4.50GHz, 6 physical cores, Hyper-Threading, DDR4 48.0 GB, 15/15/15/36, 2133 MHz, Windows [Version 10.0.19042].

В процессе исследований каждый этап модификации математических моделей был экспериментально проверен, проводились первичные численные расчёты на модели с использованием схемы ТС₁ состоящую из трёх зон надёжности и трёх связей с топологией кольцо. Такой подход обеспечивал выявление проблемных частей математических моделей, т.к. предполагал работу с ЭЭС, минимум дефицита у которой может быть рассчитан аналитически, а соответствие физическим процессам прослеживалось в численных результатах. На первых этапах работы в качестве метода оптимизации применялась совокупность метода штрафных функций и метода градиентного спуска (ШФГС). В результате тестирования [39], [40] модели МДМ₂ на схеме ТС₁ было получено решение (рисунок 4.5), в котором обе оптимизированные переменные отвечающие за перетоки мощности в разных направлениях в рамках связи С31 имели положительные значения, что говорит о несоответствии модели физическим процессам, а именно то, что каждая линия электропередачи в каждом конкретном режиме может работать только в одном направлении.

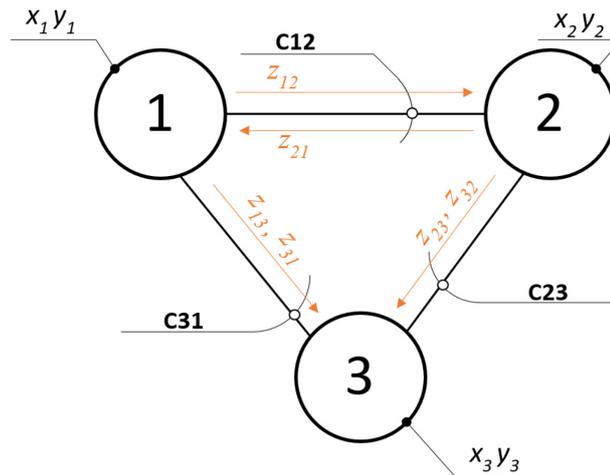


Рисунок 4.5 – Схематичное представление распределения электроэнергии

Найденное решение содержало данные о наличии задействованных перетоков (таблица 4.1), мощность в которых распределялась в обе стороны одновременно, что не соответствует физической действительности. Это говорит о том, что только одна переменная из перетоков z_{12} или z_{21} , отвечающих за одну связь, может принимать значение отличное от 0. Для устранения данной проблемы было сформулировано дополнительное ограничение на перетоки в следствии чего была разработана модель МДМ₃.

Таблица 4.1. Результаты теста, модель МДМ₂.

	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{z}_{12}	\bar{z}_{21}	\bar{z}_{13}	\bar{z}_{31}	\bar{z}_{23}	\bar{z}_{32}	
Ограничения (МВт)	158	109	83	91	98	201	10	10	10	10	10	10	
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	z_{12}	z_{21}	z_{13}	z_{31}	z_{23}	z_{32}	a
ШФГС (МВт)	103,94	105,21	83	91	98	102	3,94	1	10	0	10	0	0,05

Тем не менее при тестировании модели МДМ₃ разными методами оптимизации могут возникать решения с физически неверным распределением перетоков мощности, при этом значение целевой функции определяется верно и является абсолютным минимумом. Например, вместо движения мощности по единственной связи в одном направлении представленном переменной z_{13} , как показано на рисунке 4.5, из профицитной ЗН 1 в дефицитную ЗН 3 также задействуется дополнительная зона надежности 2 и связи C12 и C23, в чем нет прямой необходимости. Такое распределение «сквозь» дополнительную ЗН 2 не

корректно, т.к. используется два дополнительных перетока мощности на каждом из которых имеются потери.

Исходя из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что модель с квадратичными потерями, имеет множество оптимальных решений, где минимум дефицита мощности всегда определяется однозначно, а остальные параметры могут отличаться. Для более наглядного подтверждения наличия множества решений были проведены дополнительные расчеты ТС₁ и МДМ₃ с различными стартовыми точками, заданными для метода градиентного спуска, отраженные в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Результаты тестов мульти старта ШФГС.

$a = 0,00009$			Эксперименты №									
			1		2		3		4		5	
\bar{x}_1	158	x_1	0	103,31	10	103,31	50	103,31	100	102,88	101	104,06
\bar{x}_2	109	x_2	0	105,68	10	105,686	50	105,68	100	106,11	108	104,939
\bar{x}_3	83	x_3	0	83	10	83	50	83	100	83	83	83
\bar{y}_1	91	y_1	0	91	10	91	50	91	100	91	91	91
\bar{y}_2	98	y_2	0	98	10	98	50	98	100	98	98	98
\bar{y}_3	201	y_3	0	103	10	103	50	103	100	103	102,99	103
\bar{z}_{12}	10	z_{12}	0	2,3156	10	2,315	50	2,3157	100	1,8873	10	3,06
\bar{z}_{21}	10	z_{21}	0	0	10	0	50	0	100	0	0	0
\bar{z}_{13}	10	z_{13}	0	10	10	10	50	10	100	10	10	10
\bar{z}_{31}	10	z_{31}	0	0	10	0	50	0	100	0	0	0
\bar{z}_{23}	10	z_{23}	0	10	10	10	50	10	100	10	0	10
\bar{z}_{32}	10	z_{32}	0	0	10	0	50	0	100	0	0	0

Результаты представлены в таблице 4.2, где номер в заголовке является порядковым номером эксперимента, первый столбец каждого эксперимента описывает значения параметров стартовой точки (МВт), во втором столбце представлены полученные решения (МВт). В таблице 3.2 можно увидеть существенные колебания значений генераторной мощности x_1 и x_2 , а также меняющееся результирующее значение перетока z_{12} . При этом значения покрываемой нагрузки y_1 , y_2 , y_3 – не меняются, что говорит о том, что был найден минимум функции. Таким образом, результаты показывают существование множества оптимальных решений.

Для решения найденной проблемы, был предложен ряд модификаций, описанных ранее в главе 2.3, а также в [39], [40], [51], где в первую очередь проводится изменение балансовых ограничений-равенств на ограничения-неравенства и используется математическая модель с двухэтапной оптимизацией (2.30), (2.18) – (2.21), (2.28), (2.31). Работоспособность данного подхода поочередной двухэтапной оптимизации и взаимодействия моделей, где первый этап отражен в таблице 4.3, а второй в таблице 4.4, была проверена с использованием схемы ТС₁, и методом ШФГС.

Таблица 4.3. Результаты теста, первый этап оптимизации.

	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{z}_{12}	\bar{z}_{21}	\bar{z}_{13}	\bar{z}_{31}	\bar{z}_{23}	\bar{z}_{32}	
Ограничения (МВт)	158	109	83	91	98	201	10	10	10	10	10	10	
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	z_{12}	z_{21}	z_{13}	z_{31}	z_{23}	z_{32}	a
ШФГС (МВт)	158	109	83	91	98	93	0,22	0	10	0	10	0	0,05
GAMS (МВт)	101	108	83	91	98	93	0	0	10	0	10	0	0,05

Результаты работы первого этапа отображены в таблице 4.3, параметры, полученные в ходе теста второго этапа указаны в таблице 4.4. В рамках работы, для контроля полученных решений, применялась система GAMS, где в свою очередь использовался нелинейный решатель CONOPT. Данный решатель имеет закрытый код и сложную систему преобразования задачи в упрощенный вид, а также разделяет решение задачи на несколько этапов где происходит взаимодействие различных методов оптимизации. Первый этап начинается с процедуры «настройки начальной точки», изменяя отдельные переменные по одной за раз. Процедура основана на методе Ньютона с некоторыми эвристическими модификациями. Далее происходит переход к следующим этапам, где модель решается методом последовательного линейного программирования (SLP), после чего, происходит спуск методом сопряженных градиентов, далее запускается решение методом последовательного квадратичного программирования (SQP).

Из полученных результатов таблицы 4.4 видно, что параметры, полученные при использовании данной совокупности моделей, являются адекватными и близки к расчетным значениям коммерческого решателя GAMS.

Таблица 4.4. Результаты теста, второй этап оптимизации.

	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{z}_{12}	\bar{z}_{21}	\bar{z}_{13}	\bar{z}_{31}	\bar{z}_{23}	\bar{z}_{32}	
Ограничения (МВт)	158	109	83	91	98	93	10	10	10	10	10	10	
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	z_{12}	z_{21}	z_{13}	z_{31}	z_{23}	z_{32}	a
ШФГС (МВт)	99,5	106,5	83,11	91	98	93	0	0	8,49	0	8,49	0	0,05
GAMS (МВт)	101	108	83	91	98	93	0	0	10	0	10	0	0,05

Решение задачи оптимизации методом градиентного спуска и метода штрафных функций с применением только одного параметра штрафа $\gamma=10$ уже занимал около 10 секунд, а его дальнейшее применение для расчетов с использованием схемы ТС₃ и МДМ₃ требовало уже 2 минуты 48 секунд. Сложность расчетов еще заключалась в необходимости постоянного подбора размера шага для движения по антиградиенту, при изменении размерности задачи, а также нестабильные результаты и постоянные провалы в локальные минимумы.

Полученные результаты показали, то что метод ШФГС требует тщательной настройки параметра шага и тратит несоизмеримо много времени на оптимизацию систем с большим числом зон надежности чем 3, что не удовлетворяет требованиям к эффективности применяемого метода. В дальнейшей работе были реализованы и применены методы наискорейшего градиентного спуска и метода сопряженных градиентов. Исследования проводились с использованием модели МДМ₃ и тестовыми схемами ТС₁ и ТС₃.

Метод наискорейшего спуска и штрафных функций в виду наличия механизма самостоятельного уточнения шага не нуждался в постоянной настройке. Локальные решения обнаруживались ~ 1 раз на 15 испытаний Тандем метода наискорейшего спуска и штрафных функций тратил на вычисления МДМ₃ для ТС₁ – 5 секунд на первую итерацию метода штрафных функций с параметром $\gamma=10$, на последующие две итерации на порядок увеличивающие параметр γ , и повышающие точность вычислений требовалось менее секунды. На решение задачи с 7 зонами

надежности требовалось до 25 секунд на полный цикл всех итераций метода штрафных функций.

Результаты, достигнутые с помощью метода штрафных функций и метода сопряженных градиентов в целом схожи с методом наискорейшего спуска, однако в данном методе добавилась возможность настройки момента рестарта и параметров вычисления коэффициента Флетчера-Ривса, что также влияет на скорость сходимости метода.

Полученные результаты, обозначенные в таблице 4.5 показывают точность работы метода с погрешностью до 0,01 вызванной погрешностью численных преобразований и вычислений за счет представления чисел в ЭВМ. Общая скорость вычислений повысилась, а для ТС₁ составила 2 секунды на все итерации метода штрафных функций.

Таблица 4.5. Результаты решения МДМ₃ методом сопряженных градиентов и штрафных функций.

	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}_3	\bar{z}_{12}	\bar{z}_{21}	\bar{z}_{13}	\bar{z}_{31}	\bar{z}_{23}	\bar{z}_{32}	
Ограничения (МВт)	158	109	83	91	98	201	10	10	10	10	10	10	
	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	z_{12}	z_{21}	z_{13}	z_{31}	z_{23}	z_{32}	a
Решение $\gamma = 10$ (МВт)	99,5	106,68	83,11	91	98	93	0,22	0	8,49	0	8,49	0	0,00005
Решение $\gamma = 100$ (МВт)	100,97	107,9	83	91	98	93	0,01	0	9,96	0	9,96	0	0,00005
Решение $\gamma = 1000$ (МВт)	100,99	107,98	83	91	98	93	0,01	0	9,98	0	9,98	0	0,00005
Верное решение (МВт)	101	108	83	91	98	93	0	0	9,99	0	9,99	0	0,00005

Для проверки работоспособности и скорости вычислений метода сопряженных градиентов в паре с методом штрафных функций в задаче МДМ₃ и ТС₃ использовались начальные параметры, обозначенные в таблицах 4.6 и 4.7.

Таблица 4.6. Характеристика зон надежности тестовой системы ТС₃.

Узлы расчетной схемы	Генераторная мощность x_i (МВт)	Мощность нагрузки y_i (МВт)	Небаланс (МВт)
1	2458	2734	-276
2	1600	1760	-160
3	383	528	-145
4	1350	170	1180
5	409	1647	-1238
6	921	514	407
7	0	200	-200
Система	7121	7553	-432

Стоит отметить, что некоторые зоны надежности имеют избыточные генераторные мощности (4, 6), а некоторые являются дефицитными (1,2,3,5,7). Всего система имеет 7 связей (таблица 4.7), пропускная способность каждой связи по направлениям была одинаковой, в прямом и обратном. Так же каждая связь имела индивидуальный коэффициент потерь. В результате полученные значения минимума дефицита мощности были выше значений, полученных с помощью комплекса GAMS (решателя CONOPT) и отличались на 3 Мвт. На полный цикл решения данной задачи методом сопряженных градиентов и всех итераций штрафных функций потребовалось 3 секунды.

Таблица 4.7. Характеристика межсистемных связей тестовой схемы ТС₃.

Начальный и конечный номер узла по связи	Пропускная способность связи по направлениям:		Коэффициент потерь
	прямое (МВт)	Обратное (МВт)	
1 – 2	360	360	0,000078
2 – 3	150	150	0,000050
2 – 4	200	200	0,000046
2 – 5	800	800	0,000017
4 – 5	1200	1200	0,000009
5 – 6	300	300	0,000008
5 – 7	150	150	0,000009

Также проводились расчеты методом сопряженных градиентов и штрафных функций с применением модели МДМ₃ для ТС₅, результаты найденного дефицита показали отклонение на 5 Мвт в большую сторону чем результаты, полученные с помощью комплекса GAMS (решателя CONOPT). На решение задачи для данной схемы было затрачено 2 минуты 17 секунд.

Таким образом метод сопряженных градиентов в паре с методом штрафных функций показывает лучшие результаты работы с моделями минимизации дефицита мощности с учетом квадратичных потерь, не требует постоянной настройки и подбора шага в зависимости от решаемой задачи. По сравнению с методами градиентным спуском и наискорейшим спуском, метод сопряженных градиентов показывает лучшие результаты как по времени работы, так и по достигнутой точности, является эффективным методом для решения задач МДМ.

4.3. Численные эксперименты определения минимумов дефицита мощности для моделей МДМ методами дифференциальной эволюции

Экспериментальные расчеты, на подобие представленных для группы градиентных методов, проводились для систем различной конфигурации с разными входными параметрами [36], [41], [43]. В качестве основных тестируемых систем использовались системы с 3-я (ТС₁, ТС₂) и 7-ю (ТС₃, ТС₄) зонами надежности. Использовались модели с квадратичными потерями МДМ₃ и ее модифицированной версии с контролируемыми сечениями МДМ₄. Тестировались следующие методы: DE, coDE, jDE, chDE и aDE с учетом разработанных модификаций и одной итерацией метода штрафных функций, где для каждого из методов использовались обозначенные ранее стратегии мутации DE/best/1, DE/current to rand/1, DE/current to best/1, DE/rand/2, DE/best/2, DE/rand/3, DE/best/3. Точность расчетов проверялась с помощью комплекса высокоуровневой системы моделирования для математической оптимизации (GAMS, решатель CONOPT).

В численных экспериментах использовались методы дифференциальной эволюции, которые применялись к схемам ТС₂, ТС₄ и ТС₅. Для работы с моделью

МДМ₃ использовались схемы ТС₂ и ТС₄ где в расчет берутся только пропускные способности линий, без контролируемых сечений обозначенных зеленым цветом на рисунках 3.5 и 3.7. Для моделирования МДМ₄ использовались схемы ТС₂ и ТС₄, с учетом обозначенных зеленым цветом КС. Для каждой из схем были обозначены характеристики линий для МДМ₃ и контролируемых сечений для МДМ₄. Основные параметры системы для ТС₂ обозначены в таблице 3.8.

Таблица 4.8. Характеристика ЛЭП и КС для ТС₂.

ЛЭП наименование	Коэффициент потерь	ЛЭП (МВт)		КС (МВт)		КС наименование
		Прям.	Обратн.	Прям.	Обратн.	
2-1(1)	0,00060	25	25	50	50	С12
2-1(2)	0,00060	25	25			
3-2(1)	0,00001	10	10	5	5	С23
3-2(2)	0,00001	10	10			
3-2(3)	0,00001	10	10	80	80	С31
1-3	0,00017	80	80			

Модель с 7-ю узлами и контролируемыми сечениями представленная в виде схемы ТС₄ имеет самостоятельный набор параметров, описывающий пропускные способности ЛЭП в прямом и обратном направлениях, что требуется для моделирования МДМ₃, которые представлены в таблице 3.9. Также в таблице 3.10 обозначены контролируемые сечения и входящие в них ЛЭП для моделирования МДМ₄ схемы ТС₄.

Таблица 4.9. Характеристика ЛЭП для ТС_{3,4}, МДМ₃.

ЛЭП наименование	Коэффициент потерь	ЛЭП (МВт)	
		Прям.	Обратн.
1 – 2	0,00040	180	180
2 – 3	0,00002	75	50
2 – 4	0,00018	200	200
2 – 5	0,00022	800	1000
4 – 5	0,00001	1200	1200
5 – 6	0,00052	300	300
5 – 7	0,00031	150	150

В первую очередь были проведены запуски вышеописанных методов дифференциальной эволюции (DE, coDE, jDE, chDE и aDE). Каждый метод был

запущен с каждой из ранее рассмотренных стратегий мутации (DE/best/1, DE/current to rand/1, DE/current to best/1, DE/rand/2, DE/best/2, DE/rand/3, DE/best/3). Каждое сочетание метода и стратегии мутации было запущено по 50 раз для рассматриваемых схем ТС₂ и ТС₄ моделируемых с помощью МДМ₃.

Таблица 4.10. Характеристика ЛЭП для ТС_{3,4}, МДМ₄.

КС наименование	ЛЭП наименование	Коэффициент потерь	ЛЭП (МВт)	
			Прям.	Обратн.
C1	1 – 2	0,00040	1310	1460
	2 – 3	0,00002		
	2 – 5	0,00022		
C2	2 – 4	0,00018	1400	1400
	4 – 5	0,00001		
C3	4 – 5	0,00001	2000	2200
	2 – 5	0,00022		
C4	5 – 7	0,00031	450	450
	5 – 6	0,00052		
C5	5 – 7	0,00031	150	150

В качестве начальных параметров для методов дифференциальной эволюции были выбраны следующие:

- максимальное количество поколений 25 000;
- фактор мутации $F = 0.6$;
- вероятность скрещивания $CR = 0.9$;
- мультипликатор размера популяции 15.
- параметр штрафа γ для штрафных функций 10.

В качестве критерия останова использовалась проверка минимальной разницы значений целевых функций полученного и предыдущего best вектора. Для каждой из связок (метод ДЕ) + (стратегия мутации) были определены накапливающиеся параметры, а именно: минимальное, максимальное и среднее время работы, значение рассчитанной целевой функции и количество затраченных итераций для связки метода ДЕ и стратегии мутации.

Количество тестов для каждой связки составляло 50 вычислений. В результате работы программы мы получили обширную картину взаимодействия

разных методов и мутаций для модели МДМ₃ представленных на рисунках 3.9 и 3.10).

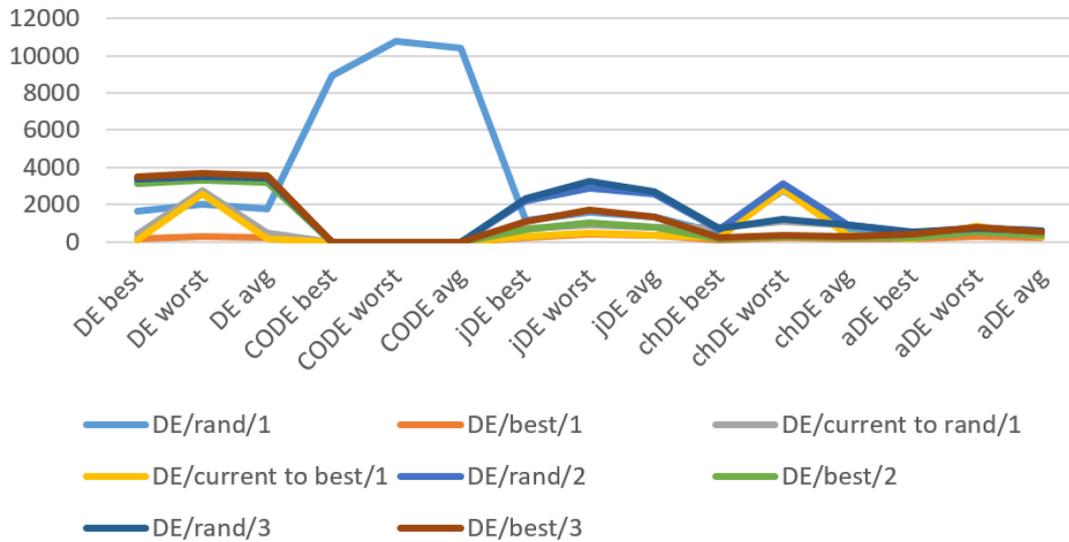


Рисунок 4.6 – Время решения задачи связками методов DE и стратегий мутации для схемы ТС₂ без КС, моделируемой с помощью МДМ₃

Как видно из графика (рисунок 4.6) наибольшая просадка по времени работы наблюдается у метода соDE, связка также практически достигла лимита итераций при работе со схемой ТС₂. Как было замечено ранее, в данном методе применяется единая связка из трех стратегий мутации, поэтому вычисления проводились только для них, без вмешательства других стратегий мутаций. Что касается остальных методов дифференциальной эволюции все выглядит не так однозначно.

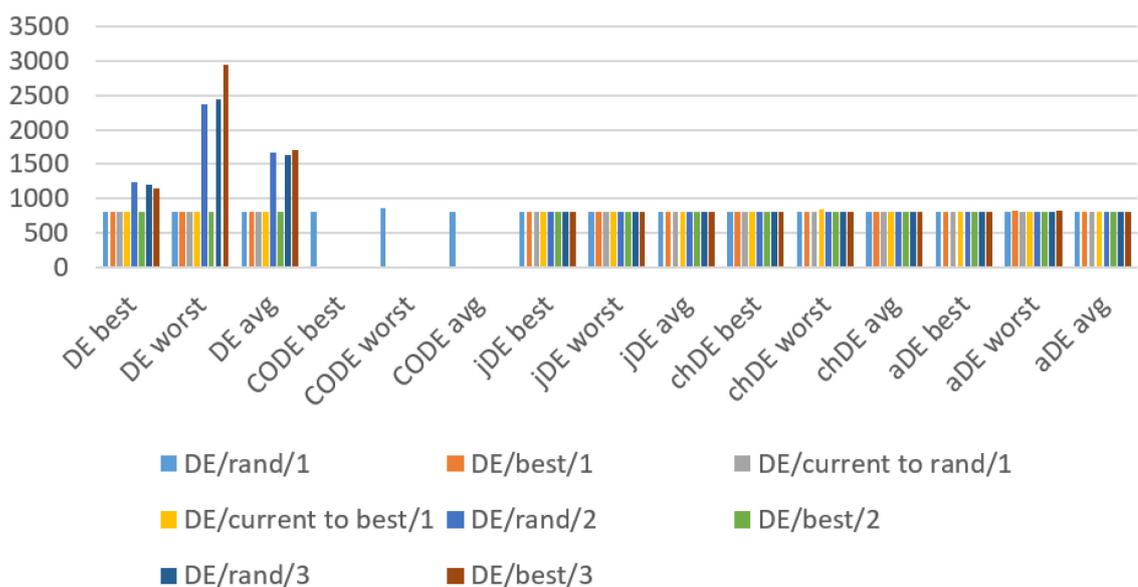


Рисунок 4.7 – Достигнутый минимум (МВт) связками методов DE и стратегий мутации для схемы ТС₂ без КС, моделируемой с помощью МДМ₃

Полученные дефициты, обозначенные на рисунке 4.7, в некоторых случаях отличаются от всех и имеют пики, что говорит о том, что, пользуясь данными связками, решение не было достигнуто. В частности, неверные значения были получены при использовании связок DE и DE/rand/2, DE/rand/3, DE/best/3. Решение задач, также осуществлялось с помощью системы GAMS, в результате работы которой для ТС₂, МДМ₃ было получено оптимальное значение 798,757 МВт. В тоже время все стабилизовавшиеся связки остановились на значении 798,752 МВт для ТС₁, МДМ₃ что говорит о получении лучших результатов найденного дефицита мощности. Лучшее время решения задачи связкой метода aDE и DE/rand/1 составило 46 мсек.

Такие же исследования проводились для схемы ТС₄ моделируемой МДМ₃. Количество тестов для каждой связки также составляло 50 вычислений. В результате работы программы мы получили обширную картину взаимодействия разных методов и мутаций для модели МДМ₃ представленную на рисунках 4.8 и 4.9.

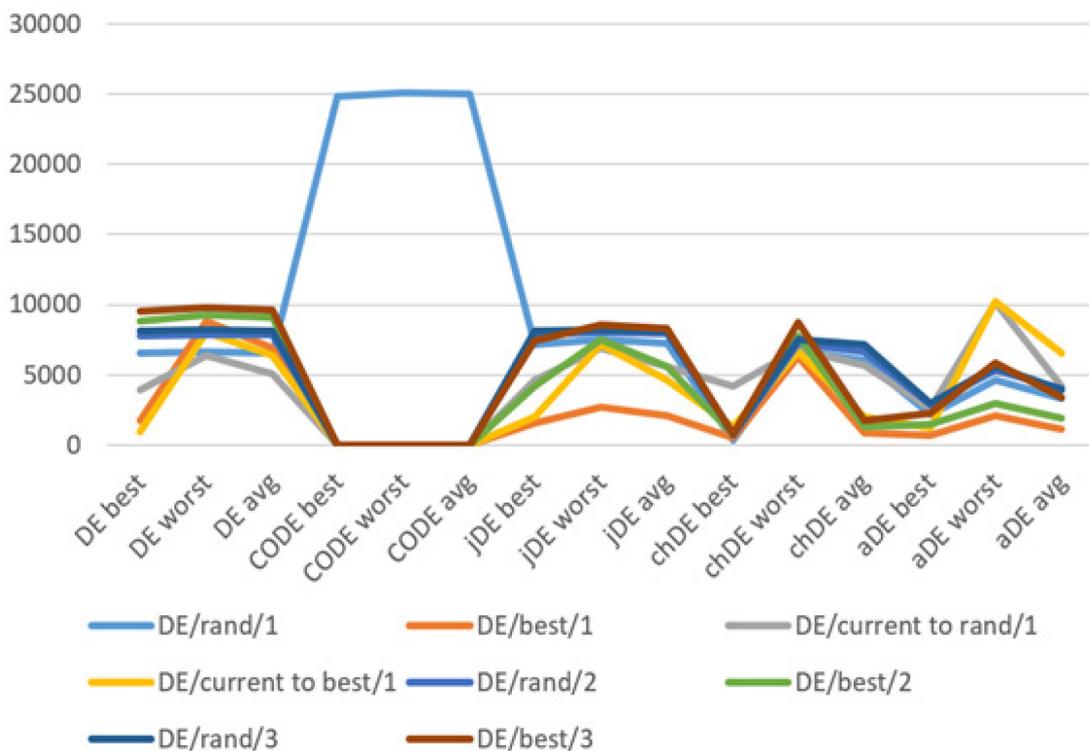


Рисунок 4.8 – Время решения задачи связками методов DE и стратегий мутации для схемы ТС₄ без КС, моделируемой с помощью МДМ₃

Как видно из графика 3.11 наибольшая просадка по времени работы также наблюдается у метода coDE, как и при решении для предыдущей схемы, метод достиг лимита итераций и окончательное решение так и не было получено. Что касается остальных связок методов дифференциальной эволюции и стратегий мутации, часть связок не справилась с поставленной задачей, а именно следует рассматривать связки, превышающие значение 549,194 МВт (рисунок 3.12). Для данной системы также был рассчитан контрольный результат с помощью системы GAMS который был равен 549,233 МВт, что опять же говорит о высокой точности используемых связок метода DE в численных экспериментах с моделью МДМ₃.

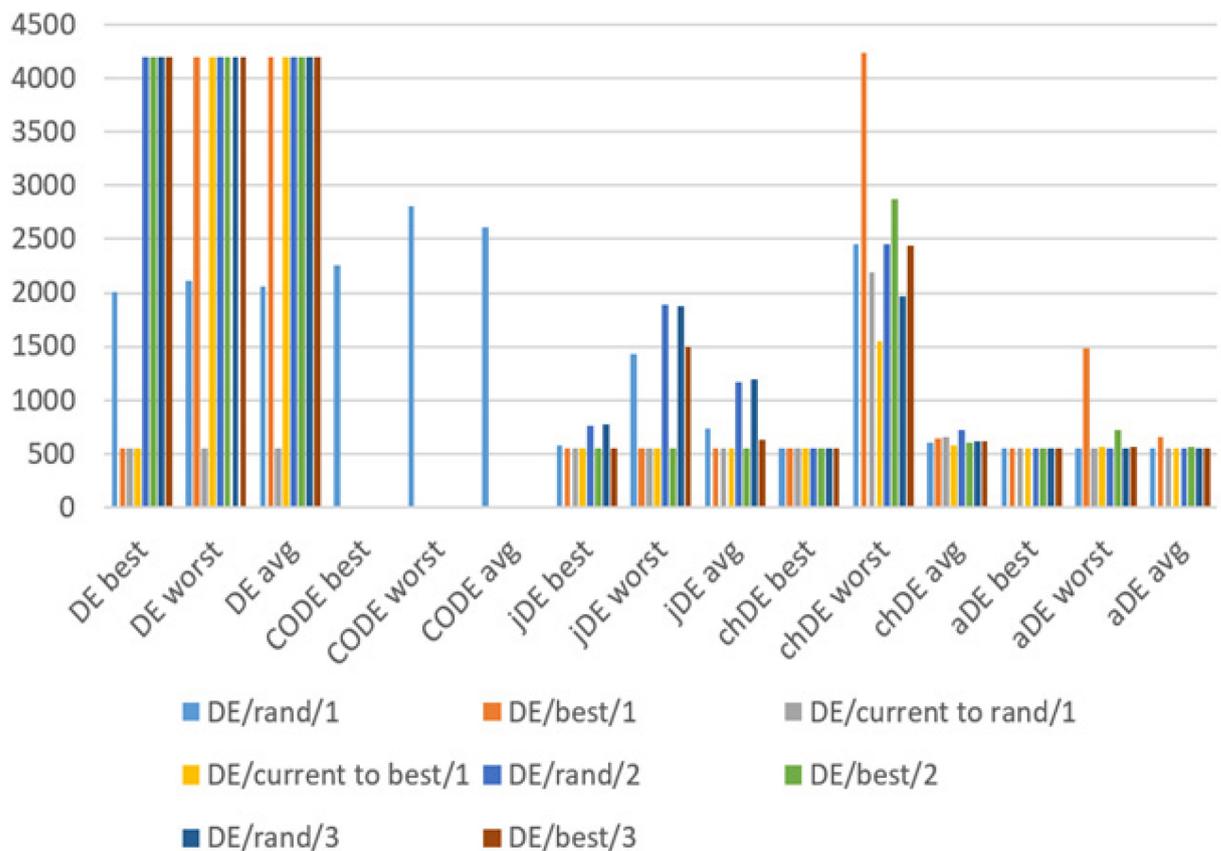


Рисунок 4.9 – Достигнутый минимум (МВт) связками методов DE и стратегий мутации для схемы ТС₄ без КС, моделируемой с помощью МДМ₃

Из полученных графиков видно, что наблюдается нестабильность результатов работы связки стандартного метода DE, и стратегий мутации DE/rand/2, DE/rand/3, DE/best/3, DE/rand/1. Что же касается работы остальных связок с системой ТС₄, необходимо отметить наличие неверных результатов мутаций для метода jDE и несмотря на то, что для всех связок метода chDE имеются

верные решения, показатель chDE worst говорит о том, что получение корректных результатов не гарантировано.

Наиболее стабильными связками с корректными результатами значений целевых функций для обеих систем можно считать следующие: DE/current to rand/1; jDE and DE/best/1; jDE and DE/current to rand/1; jDE and DE/current to best/1; jDE and DE/best/2; aDE and DE/rand/1; aDE and DE/current to rand/1; aDE and DE/rand/2; aDE and DE/rand/3. Для определения наиболее эффективных связок с точки зрения времени и затрачиваемых ресурсов для решения задачи МДМ₃ был сформирован ранжированный список учитывающий время, требуемое на решение системы ТС₄ а также количество затраченных итераций, который представлен в таблице 4.11.

Таблица 4.11. Ранжированный список эффективных связок для модели МДМ₃.

Метод	Стратегия мутации	Время выполнения (мсек.)	Кол-во затраченных итераций
jDE	DE/best/1	2062	6887
aDE	DE/rand/1	3337	8031
aDE	DE/rand/3	3886	8792
aDE	DE/rand/2	3967	9176
aDE	DE/current to rand/1	4208	9970
jDE	DE/current to best/1	4611	16181
DE	DE/current to rand/1	5069	19954
jDE	DE/current to rand/1	5545	19238
jDE	DE/best/2	5562	17553

Всего было обнаружено 9 стабильных связок. Оценку времени работы проводили для ТС₃, т.к. все стабильно работающие связки уже присутствовали в наборе связок для ТС₁. Это позволило дополнительно отсеять менее эффективные связки, которые плохо работают для ЭЭС с большим количеством переменных. Как видно из таблицы 4.11 быстрое решение проблемы МДМ₃ могут обеспечить связки jDE и DE/best/1, а также aDE и DE/rand/1. Для ранжирования использовалось среднее время работы метода над задачей до достижения критерия останова.

Далее проводились расчеты с использованием схем ТС₂ и ТС₄ с учетом контролируемых сечений, моделируемых с помощью МДМ₄. Начальные

параметры DE, критерий останова и накапливаемые данные идентичны параметрам предыдущих численных экспериментов. Как было показано ранее, количество оптимизируемых переменных напрямую влияет на скорость и точность работы метода, поэтому исследование проводилось с использованием схем (ТС₂ и ТС₄ с учетом КС), однако основные выводы были сделаны на основе работы связок методов и стратегий мутации с использованием схемы ТС₄.

По результатам исследований (рисунок 4.10) можно также наблюдать нестабильность расчетов метода coDE, нужное значение целевой функции достигнуто только для системы ТС₂ с учетом КС, где количество оптимизируемых параметров меньше.

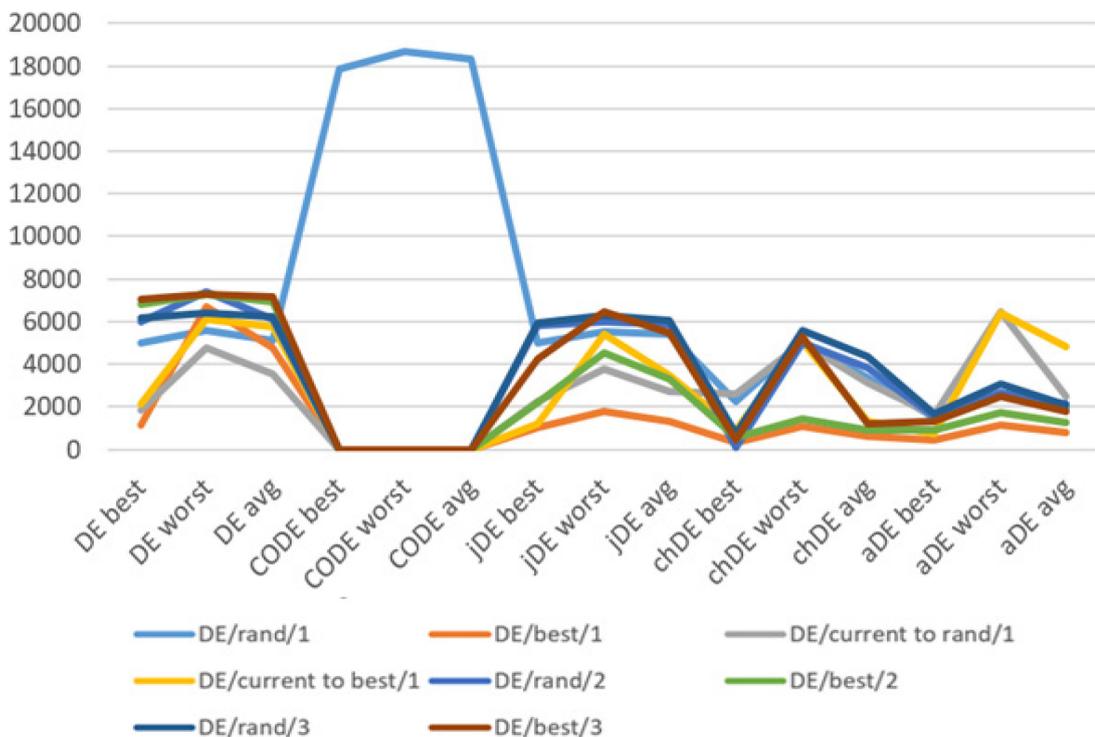


Рисунок 4.10 – Время решения задачи связками методов DE и стратегий мутации для схемы ТС₄ с учетом КС, моделируемой с помощью МДМ₄

Также для рассматриваемых систем были определены значения минимумов дефицита мощности с учетом модели МДМ₄ с помощью системы GAMS. В результате чего, для ТС₂ с учетом КС было найдено оптимальное значение равное 823,754 МВт, расчетные значения, полученные методами DE, стабилизировались на уровне 823,607 МВт что показывает лучших результат. Для ТС₄ с учетом КС также было рассчитано контрольное значение равное 462,632 МВт, при этом

методы DE стабилизировались на уровне 462,685 МВт. Такие показатели говорят об адекватности примененных подходов к разработанным моделям.

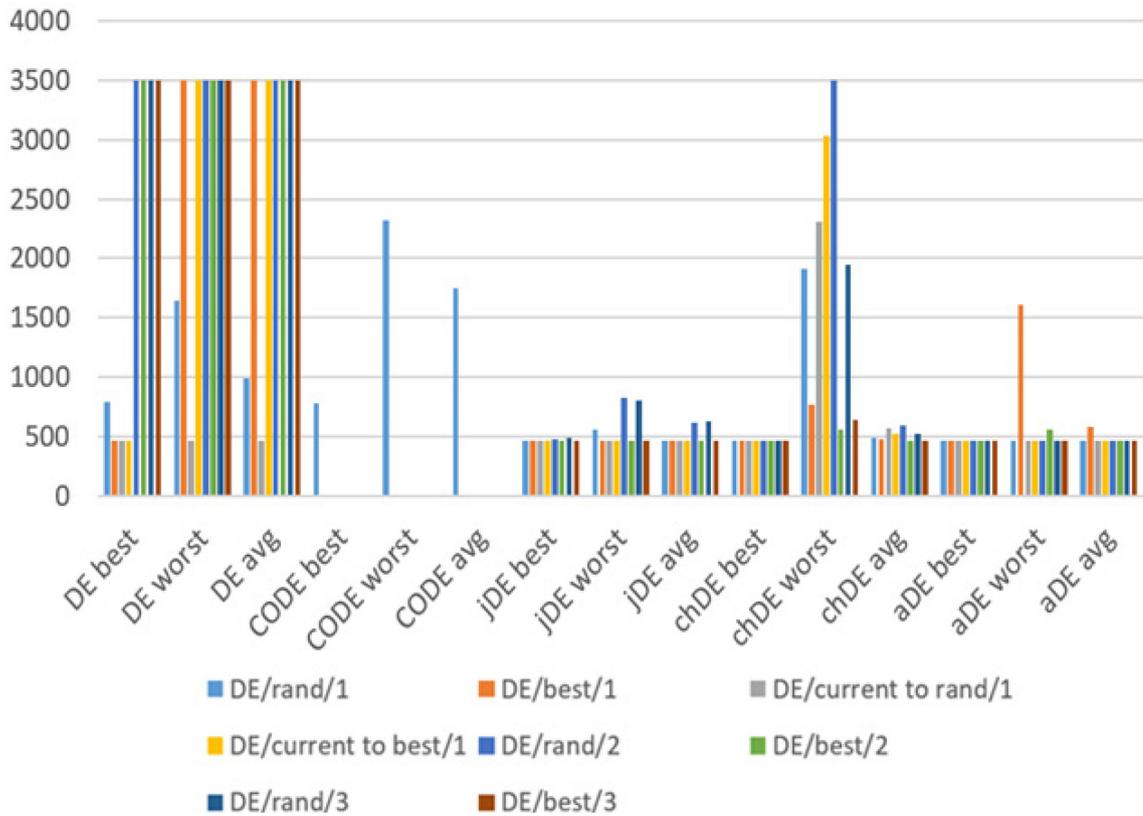


Рисунок 4.11 – Достигнутый минимум (МВт) связками методов DE и стратегий мутации для схемы ТС₄ с учетом КС, моделируемой с помощью МДМ₄

В соответствии с полученными результатами был сформирован второй ранжированный список из 7 связок методов и стратегий мутаций со стабильными значениями целевых функций и наилучшими показателями времени счета, список отражен в таблице 4.12.

Таблица 4.12. Ранжированный список эффективных связок для модели МДМ₄.

Метод	Стратегия мутации	Время выполнения (мсек.)	Кол-во затраченных итераций
aDE	DE/rand/1	1930	7180
aDE	DE/rand/3	2070	7311
aDE	DE/rand/2	2116	7590
aDE	DE/current to rand/1	2463	9151
jDE	DE/current to rand/1	2710	12615
jDE	DE/best/2	3312	13576
DE	DE/current to rand/1	3520	18485

По результатам ранжирования наиболее быстрое и точное решение проблемы МДМ₄ могут обеспечить связки aDE и DE/rand/1, а также aDE и DE/rand/3. Для ранжирования использовалось среднее время работы метода над задачей до достижения критерия останова.

Последние выделенные связки использовались для последующих расчетов для модели МДМ₃ и МДМ₄ для ТС₅, результаты найденного дефицита показали идентичные результаты, полученные с помощью комплекса GAMS (решателя CONOPT). На решение задачи с использованием данной схемы, связкой aDE и DE/rand/1 было затрачено 11847 мсек., а связкой aDE и DE/rand/3 – 23211 мсек.

Полученные результаты отражают работу методов DE без применения технологий распараллеливания. В случае применения распараллеленных методов DE к схемам с числом оптимизируемых параметров более 50 и числом потоков равным 12, с учетом включенной технологии Hyper-threading, было зафиксировано меньшее время работы метода на 30%. Проверялись два варианта реализации связки метода DE и DE/current to rand/1 с включенным механизмом распараллеливания OpenMP и выключенным. Вариант без параллельности показал время расчета равное 3520 мсек. для схемы ТС₃, а вариант с использовавшейся технологией распараллеливания показал 2451 мсек., без потери точности. В случае использования метода с меньшим числом оптимизируемых переменных разница во времени выполнения ниже, т.к. технология распараллеливания требует дополнительных затрат времени на упаковку потоков, работу механизма, а также зависит от текущего состояния планировщика потоков операционной системы.

Таким образом можно сказать что методы дифференциальной эволюции показывают адекватные результаты при решении задачи для моделей минимизации дефицита мощности с учетом квадратных потерь и их модифицированных версий моделей с контролируемыми сечениями. Наиболее универсальная и эффективная связка для решения поставленных задач была определена как aDE и DE/rand/1, при использовании связки DE и DE/current to rand/1 с включенной технологией

распараллеливания можно добиться меньшего времени расчета минимума дефицита мощности без потери точности.

4.4. Анализ численных экспериментов применения методов минимизации дефицита мощности.

Численные эксперименты проводились в строгом порядке. В первую очередь исследованию подверглись градиентные методы, а после – методы дифференциальной эволюции. Для проверки адекватности применяемых методов оптимизации к разработанным моделям использовались схемы ТС₁, ТС₂, ТС₃, ТС₄ и ТС₅ с характеристиками, описанными в таблицах 4.1 – 4.10. Был выбран вариант постепенного увеличения сложности решаемых задач и последовательная реализация модификаций применяемых методов оптимизации в соответствии с возникающими проблемами (низкая скорость сходимости, длительный процесс решения задачи).

В виду того, что группа градиентных методов и группа методов дифференциальной эволюции имеют разную вычислительную сложность на каждой итерации, единственный способ сравнить эффективность методов относительно друг друга является время, требуемое для решения одной задачи. Также стоит отметить что градиентные методы тестировались только для решения задачи МДМ₃ без учета контролируемых сечений. Схемы ТС₃ и ТС₄ без учета КС – идентичны, соответственно результаты работы групп методов будут сравниваться для двух предложенных схем.

Как видно из в таблицы 4.13, наиболее быстрое решение можно получить с помощью метода jDE, однако наиболее универсальным является метод aDE, т.к. показывал наиболее стабильные результаты применительно к разным моделям МДМ. Из группы градиентных методов лучше всего себя показал метод сопряженных градиентов, однако данный метод нельзя считать стабильным при решении поставленных задач МДМ. В данном методе существует проблема попадания в локальные минимумы, а также наличие некоторой погрешности в

результатах. Это говорит о том, что данный метод возможно применять, однако нет гарантий получения точного результата.

Таблица 4.13. Сравнение эффективности градиентных методов и методов дифференциальной эволюции с точки зрения времени расчетов.

Метод оптимизации	Точность	Время расчета (мсек)
Градиентный спуск, штрафные функции (3 итерации)	$3e-10$	168000
Наискорейший спуск, штрафные функции (3 итерации)	$3e-10$	25000
Сопряженных градиентов, штрафные функции (3 итерации)	$3e-13$	3711
Метод aDE, DE/rand/1, штрафные функции (1 итерация)	$3e-13$	3337
Метод jDE, DE/best/1, штрафные функции (1 итерация)	$3e-13$	2062

Также эффективность рассматриваемых методов можно сравнить по результатам их работы с моделью МДМ₃ для ТС₅, метод сопряженных градиентов показал отклонение на 5 МВт в большую сторону чем результаты, полученные с помощью комплекса GAMS (решателя CONOPT), на решение было затрачено 137000 мсек. При этом связкой aDE и DE/rand/1 было затрачено 11847 мсек., а связкой aDE и DE/rand/3 – 23211 мсек, отклонений от контрольных результатов не было, а время вычислений по сравнению с методом сопряженных градиентов на порядок меньше.

Основываясь на всех перечисленных выше результатах вычислений и сравнительного анализа полученных результатов, было определено: наиболее эффективным методом с точки зрения времени и трудозатрат в режиме однопоточных вычислений является связка методов aDE и DE/rand/1, данный метод универсально подходит для оптимизации моделей как МДМ₃, так и МДМ₄,

справляется со своей задачей в полном объеме в пределах допустимого времени счета и адекватности результатов. Версия методов DE с использованием технологий параллельных вычислений позволяет снизить время расчетов на 30% для систем с числом оптимизируемых параметров свыше 50.

4.5. Выводы по главе

В этой главе особое внимание было уделено работе тестовой программы и динамически подключаемой библиотеки блока оптимизации в рамках экспериментальных исследований разработанных и реализованных моделей минимизации дефицита мощности, а также группы градиентных методов и группы модифицированных методов дифференциальной эволюции.

В рамках экспериментов проверялась адекватность расчетов, получаемых с помощью разработанных моделей, а именно моделей минимизации дефицита мощности с квадратичными потерями и ее модифицированная версия с контролируемыми сечениями (МДМ₃ и МДМ₄ соответственно). Эксперименты проводились последовательно с постепенным увеличением сложности решаемых задач и реализацией модификаций рассматриваемых методов оптимизации в соответствии с возникающими проблемами (низкая скорость сходимости, длительный процесс решения задачи).

Методы оптимизации проверялись также последовательно, начиная с градиентного спуска, замена методов на каждом этапе проводилась в связи с превышением времени расчетов одной схемы определенным методом выделенной минуты. Таким же образом проводилось сравнение эффективности исследуемых методов применительно к разработанным моделям.

Для показательного сравнения эффективности группы градиентных методов и методов дифференциальной эволюции была выбрана система с 7-ю зонами надежности и 7-ю связями и модель с квадратичными потерями при перетоках. По итогу анализа результатов, наилучшие показатели эффективности были достигнуты связкой модифицированного метода адаптивной дифференциальной

эволюции и стратегии мутации DE/rand/1, который затрачивает 3337 мсек на решение поставленной задачи. Было замечено ускорение до 8% для модифицированных методов дифференциальной эволюции по сравнению с соответствующими методами без модификаций. Также улучшение результата времени расчета на 30% возможно за счет применения технологии распараллеливания, что также было рассмотрено в рамках экспериментов.

Полученные результаты показывают работоспособность как самих моделей, так и применяемых к ним методов из группы градиентных и дифференциальных эволюций. Реализованные модификации и применённые технологии позволяют сократить время расчетов методами дифференциальной эволюции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ существующих решений в области оценки балансовой надежности ЭЭС методом Монте-Карло осуществлялся в рамках исследований отечественных и зарубежных работ и программных комплексов. Данный анализ показал, что в современные программные комплексы в большинстве своем являются закрытым программным обеспечением с платной лицензией, где используются различные математические модели в том числе потоковые, линейные, нелинейные, линеаризованные и др. Помимо того, что использование потоковых, линейных и линеаризованных моделей ведет к снижению точности получаемых результатов, существует также проблема подмены основной цели минимизации дефицита мощности, целью минимизации затрат и учета экономических показателей, что в свою очередь существенно смещает акцент с балансовой надежности. 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 исследуемых комплексов, снижающим необходимый уровень точности оценки балансовой надежности. В свою очередь использование ресурсозатратных методов с линеаризацией моделей, также может привести к неэффективному использованию ресурсов и снижению уровня точности расчетов.

На основании полученных выводов была поставлена задача исследования, требовалось: разработать комплекс математических моделей минимизации дефицита мощности в соответствии с адекватным, физически корректным распределением потоков мощности, учитывающих дополнительные ограничения по контролируемым сечениям и матрицу сетевых коэффициентов; сравнить корректность работы и эффективность группы градиентных методов оптимизации и методов дифференциальной эволюции для минимизации дефицита мощности; разработать и реализовать динамически подключаемую библиотеку оптимизации и интегрировать её в программный комплекс для оценки балансовой надежности ЭЭС методом Монте-Карло.

В качестве исходной модели минимизации дефицита мощности для предлагаемых улучшений и разработки использовалась модель с квадратичными потерями при перетоках мощности. По результатам исследования, в данной модели были обнаружены существенный недостаток, а именно: наличие двусторонних перетоков мощности на одной связи. В результате работы было предложено дополнительное ограничение на перетоки мощности запрещающее работу связи в двух направлениях одновременно, что повысило физическую корректность модели. Также был предложен подход с использованием двух этапов последовательной оптимизации, где на первом этапе с балансировочными ограничениями неравенствами выполняется поиск минимума дефицитов мощности, а на втором этапе, оптимизированные параметры нагрузки фиксируются, проводится оптимизация с учетом балансовых ограничений равенств для суммы квадратов перетоков мощности, что в конечном итоге повышает оптимальное потокораспределение рассчитанных результатов.

Дальнейшее исследование показало, что исходная модель и ее модифицированные версии не соответствуют современным требованиям. В виду того, что в практике управления энергосистемами проводят учет не межзональных связей, а контролируемых сечений, где ограничения пропускной способности рассчитывают для контролируемых сечений в виде максимально и аварийно-допустимых перетоков активной мощности, появилась необходимость учета таких контролируемых сечений. На основе исходной модели минимизации дефицита мощности были разработаны модели учитывающие контролируемые сечения максимально аварийно-допустимых перетоков активной мощности путем внедрения дополнительных ограничений для одной модели и матрицы сетевых коэффициентов и ограничений для другой модели. Корректность всех разработанных и модифицированных моделей подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями.

В соответствии с поставленной задачей исследования, требовалось также проверить возможность применения группы градиентных методов и группы методов дифференциальной эволюции для решения задач с учетом разработанных

моделей. В виду того что рассматриваемые методы являются безусловными была решена задача применения большого спектра безусловных методов оптимизации к задаче с ограничениями равенствами и неравенствами, для чего был использован метод штрафных функций, таким образом было достигнуто преобразование задачи от формально условной к безусловной.

Были исследованы методы, использующие градиентный спуск и его вариации, а именно, стандартный метод градиентного спуска, метод наискорейшего спуска и метод сопряженных градиентов. Автоматическое уточнение шага градиентных методов был реализован и применен метод линейного поиска по правилу Армихо. Полученные экспериментальные данные показали, что применяемые к разработанным моделям минимизации дефицита мощности, градиентные методы имеют серьезный недостаток, а именно частое попадание в локальные минимумы функции, заикливания, недостаточная скорость работы, а также сильное разрастание функции после преобразования методом штрафных функций за счет верхних и нижних ограничений на переменные.

Для получения глобальных результатов и избавления от многих других проблем был проведен анализ и реализация методов дифференциальной эволюции. Методы дифференциальной эволюции позволили снизить количество необходимых ограничений используемых в методе штрафных функций, а именно были исключены верхние и нижние ограничения, т.к. метод дифференциальной эволюции (DE) имеет внутренние механизмы их учета. 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, где в ходе экспериментов было обнаружено, что существующие подходы к проверке и замене выходящих за пределы ограничений значений векторов после процедуры мутации малоэффективны. В рамках работы были предложены модификации проверки мутантных векторов, которые могут быть использованы во всех рассмотренных

методах DE и повышают их эффективность с точки зрения скорости до 8% относительно того же метода без применения предложенных модификаций.

По итогу исследований, разработанные и модифицированные модели и методы были программно реализованы в комплексе программ для оценки балансовой надежности (Python 3.6), а именно в динамически подключаемой библиотеке блока оптимизации (C++), взаимодействие которых обеспечивается технологией маршаллинга Boost::Python. Основным подходом к разработке заключался в использовании парадигмы объектно-ориентированного программирования и принципов наследования для достижения универсальности реализованных классов моделей минимизации дефицита мощности. Таким образом, в библиотеке были реализованы служебные структуры необходимые для хранения и обработки временных данных, а также абстрактный базовый класс модели от которого в последующем можно унаследовать дочерние классы с тонкой настройкой под конкретную модель минимизации дефицита мощности.

Также были программно реализованы, методы оптимизации в виде классов с учетом дополнительных перечислений и структур необходимых для их работы. Для генерации псевдослучайных чисел с помощью стандартной библиотеки «random» был реализован Singleton класс имплементации которого могут использовать методы формирования случайных чисел с учетом нормального распределения, распределения Коши, Mersenne Twister.

Общая идея методов оптимизации заключается в получении объекта модели с сигнатурой абстрактного класса и настроечных параметров, остальная логика работы инкапсулирована, а результат можно получить путем вызова метода optimize() с включенным или выключенным параметром вывода промежуточных данных о ходе оптимизации. Для повышения вычислительной эффективности методов оптимизации была применена технология распараллеливания метода дифференциальной эволюции с использованием стандарта OpenMP.

Разработанный программный комплекс с учетом разработанных математических моделей и применяемых методов оптимизации проверялся на адекватность расчетов. Эксперименты проводились последовательно с

постепенным увеличением сложности решаемых задач и реализацией модификаций рассматриваемых методов оптимизации в соответствии с возникающими проблемами (низкая скорость сходимости, длительный процесс решения задачи).

Методы оптимизации проверялись также последовательно, начиная с градиентного спуска, замена методов на каждом этапе проводилась в связи с превышением времени расчетов одной схемы определенным методом выделенной минуты. Таким же образом проводилось сравнение эффективности исследуемых методов применительно к разработанным моделям.

Полученные результаты показывают работоспособность как самих моделей, так и применяемых к ним методов из группы градиентных и дифференциальных эволюций. Реализованные модификации и применённые технологии позволяют сократить время расчетов методами дифференциальной эволюции.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БН – балансовая надёжность

ЗН – зона надёжности

КС – контролируемое сечение

ЛЭП – линия электропередачи

МДМ – минимизация дефицита мощности

МДП – максимально допустимый переток

МСК – матрица сетевых коэффициентов

ПБН – показатели балансовой надёжности

СО – системный оператор

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ЭЭС – электроэнергетические системы

EUE – Expected Unserved Energy

EPNS – Expected Power Not Supplied

LOLP – Loss of Load Probability

LOLE – Loss of Load Expectation

LOLH – Loss of Load Hours

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: в 4-х т. / под общей ред. Ю.Н.Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 2000 – Т.2:Надежность электроэнергетических систем / под ред. М.Н. Розанова. – 568 с.
2. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.2003 No281.
3. Розанов, М.Н. Надёжность электроэнергетических систем / М.Н.Розанов. – Изд. 2-е, переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. –200 с.
4. Billinton, R. Reliability Evaluation of Power Systems / R. Billinton, R. Allan. –Second Edition. –NY and London: Plenum Press, 1996. – 509 p.
5. Billinton, R. Basic Considerations in Generating Capacity Adequacy Evaluation / R. Billinton, D. Huang // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (Saskatoon, Sask, 1-4May 2005). – IEEE, 2005.– pp. 611–614.
6. Li, W. Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods and Applications / W. Li.–Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005. –325 p.
7. Васильев А.П., Гук Ю.Б., Карпов В.В. Надежность электроэнергетических установок и систем. Теория и практика. — СПб.: ГУ «Ленгосэнергонадзор», 2000. — 413 с.
8. Надежность систем энергетики и их оборудования / Под ред. Ю.Н. Руденко: В 4-х т. М.: Энергоатомиздат, 1994. Т. 1
9. Обоскалов В.П. Надежность обеспечения баланса мощности электроэнергетических систем. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. — 210 с.
10. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Модель оценки надежности электроэнергетических систем при долгосрочном планировании их работы // Электричество. — 2000. — ¹ 11. — С. 17–24.
11. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 210 с.

12. Г.Ф. Ковалев. Надежность систем электроэнергетики / Г.Ф. Ковалев, Л.М. Лебедева; отв. ред. Н.И. Воропай. - Новосибирск: Наука, 2015. - 224 с.
13. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Комплекс моделей оптимизации режимов расчетных состояний при оценке надежности электроэнергетических систем. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2000, 74 с.
14. В.И. Зоркальцев, С.М. Пержабинский, «Модель оценки дефицита мощности Электроэнергетической системы», Известия Иркутского государственного университета. Серия Математика, 3:3 (2010), 80-92.
15. Review of the current status of tools and techniques for risk-based and probabilistic planning in power systems, Working Group 601 of Study Committee C4 //International Conference on Large High Voltage Electric Systems. March. 2010
16. Fernandez Blanco Carramolino, R., Careri, F., Kavvadias, K., Hidalgo Gonzalez, I., Zucker, A. and Peteves, E., Systematic mapping of power system models: Expert survey, EUR 28875 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-76462-2, doi:10.2760/422399, JRC109123.
17. Antonopoulos G; Chondrogiannis S; Kanellopoulos K; Papaioannou I; Spisto A; Efthimiadis T; Fulli G., Assessment of underlying capacity mechanism studies for Greece, EUR 28611 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-68878-2, doi: 10.2760/51331, JRC106307
18. RTE Antares, Antares Optimization problems formulation, [Электронный ресурс] URL: <https://antares.rte-france.com>, доступ: 04.02.2021
19. RTE Antares, Modelling of flow-based domains in Antares for adequacy studies, 2017.
20. A. Gaikwad, S. Agarwal, K. Carden, N. Wintermantel, S. Meliopoulos, M. Kumbale, A Study on Probabilistic Risk Assessment for Transmission and Other Resource Planning, Electric Power Research Institute For EISPC and NARUC (NARUC-2013-RFP027-DE0316), 2015.
21. URREGO AGUDELO Lilliam, A novel method for the Approximation of risk of Blackout in operational conditions, Laboratoire Image- Signaux et Systèmes Intelligents / LISSI - EA 3956 (laboratoire) , 2016

22. Milorad Pasic, Survey of Tools for Risk Assessment of Cascading Outages, IEEE GM, 2011
23. Ying-Yi Hong, Lun-Hui Lee Reliability assessment of generation and transmission systems using fault-tree analysis, Energy Conversion and Management 50 (2009) 2810–2817.
24. Siemens AG and Siemens Industry, Inc., Model Management Module for PSS®E, 2020
25. Siemens AG and Siemens Industry, Inc., Optimal Power Flow PSS®E, 2014
26. Siemens AG and Siemens Industry, Inc., High-performance Transmission Planning and Operations Software for the Power Industry, PSS®E, EMDG-B10125-00-7600--PSSE Brochure, 2014.
27. PSR – Energy Consulting and Analytics, OPTGEN User Manual, Version 7.4, 2019
28. ENTSO-E, Mid-term Adequacy Forecast 2018, Appendix 1: Methodology and Detailed Results, 2018
29. PLEXOS Market Simulation Software [Электронный ресурс], URL: <https://energyexemplar.com/solutions/plexos/> доступ: 04.02.2021
30. Kelvin Chu, MARS Multi-Area Reliability Simulation, EOP – On Demand Feature, General Electric Company, 2014
31. Panida Jirutitijaroen, Chanan Singh, Reliability and Cost trade-off in Multi-Area Power System Generation Expansion Using Dynamic Programming and Global Decomposition, IEEE Transactions on power systems, Vol 21, No 3, August 2006
32. J.McCalley, Module PE.PAS.U21.5 Multiarea reliability analysis // Electrical & Computer Engineering, Iowa State University, USA, – 81p.
33. Simulate security-constrained unit commitment and economic dispatch in large-scale transmission networks // ABB GridView, 2016.
34. Чукреев Ю.Я. Модели обеспечения надежности электроэнергетических систем. Сыктывкар. Коми НЦ УрО РАН.1995. 176 с
35. Обоскалов, В. П. (2020). Алгоритмические аспекты расчета вероятностных показателей дефицита мощности в задаче балансовой надежности

ОЭС. Известия РАН. Энергетика 2020 №2, 59-74.
<https://doi.org/10.31857/S0002331020010094>

36. Iakubovskii, D., Krupenev, D., Komendantova, N., Boyarkin, D. A model for power shortage minimization in electric power systems given constraints on controlled sections / Energy Reports, 2021, 7, pp. 4577–4586, DOI:10.1016/j.egy.2021.07.022

37. Boyarkin D., Krupenev D., Iakubovskii D. Improvement in the computational efficiency of a technique for assessing the reliability of electric power systems based on the Monte Carlo method // Reliability Engineering & System Safety, Volume 204, December 2020, DOI: 10.1016/j.res.2020.107171

38. Iakubovskii D., Komendantova N., Rovenskaya E., Krupenev D., Boyarkin D. Impacts of earthquakes on energy security in the Eurasian economic union: Resilience of the electricity transmission networks in Russia, Kazakhstan, and Kyrgyzstan // Geosciences (Switzerland). Vol.9. №1. ID: 54. 2019. DOI: 10.3390/geosciences9010054

39. Якубовский Д.В. «Анализ моделей минимизации дефицита мощности при оценке балансовой надежности электроэнергетических систем» // Системные исследования в энергетике/ Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып. 48. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2017. –131с.

40. Iakubovskiy D.V., Krupenev D.S., Boyarkin D.A. An Analysis of Shortage Minimization Models to Assess Power System Adequacy // Energy Systems Research. Vol.1. No.3. 2018. P.25-32. DOI: 10.25729/esr.2018.03.0003

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

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

43. Якубовский Д.В., Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А. Модель минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем с учетом ограничений по контролируемым сечениям // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 2 (82). – С. 95–120. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-95-120.

44. Бояркин Д.А., Крупенев Д.С., Якубовский Д.В. Использование методов машинного обучения при оценке надёжности электроэнергетических систем методом Монте-Карло // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». Т.11. №4. 2018. С.146-153. DOI: 10.14529/mmp180411.

45. Крупенев Д.С., Ковалев Г.Ф., Бояркин Д.А., Якубовский Д.В., Лебедева Л.М. Исследование балансовой надёжности и обоснование резервов генерирующей мощности перспективных схем развития электроэнергетических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 6 (63). С. 40-44.

46. Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А., Якубовский Д.В. Северина Я.Д. Исследование влияния аварийности энергетического оборудования на показатели балансовой надёжности и величину оперативного резерва электроэнергетических систем // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. Материалы 92-го заседания семинара. В 3-х книгах С. 149-158.

47. Бояркин Д.А., Крупенёв Д.С., Якубовский Д.В. Формирование случайных состояний электроэнергетических систем при оценке их надёжности методом статистических испытаний / «Надёжность и безопасность энергетики». – 2017г. – №1. – С.33-41, г. Москва.

48. Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А., Якубовский Д.В. Исследование математических моделей минимизации дефицита мощности с квадратичными потерями в линиях электропередачи и с использованием сетевых коэффициентов (коэффициентов чувствительности) // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. Материалы 93-его заседания семинара. В 2-х книгах С. 149-158.

49. Boyarkin D., Krupenev D., Yakubovskii D. Multi-output regression in electric power systems adequacy assessment using monte-carlo method // SIBIRCON 2019 - International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information

Sciences, Proceedings. – 2019. – Novosibirsk. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958279

50. Boyarkin D., Krupenev D., Iakubovskii D. Application the differential evolution for solving the problem of minimizing the power shortage of electric power systems / 2019 International conference of young scientists on energy systems research, ESR 2019 Irkutsk, 27-29 may 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201911403002

51. Якубовский Д.В., Бояркин Д.А., Крупенев Д.С. Применение двухэтапной оптимизации в модели потокораспределения при оценке балансовой надёжности ЭЭС / Информационные и математические технологии в науке и управлении, № 1 (13), С: 85-95, 2019, DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-07

52. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2017614029, Программно-вычислительный комплекс «Надёжность»

53. Свидетельство о регистрации базы данных №2017620403, База данных схем электроэнергетических систем для программно-вычислительного комплекса «Надёжность»

54. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2019662459, Обработка ретроспективных данных о ремонтах энергетического оборудования.

55. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2019662460, Программный комплекс формирования графиков нагрузки.

56. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №RU 2019662426, Библиотека пакетной оптимизации.

57. Томас Х. Кормен и др. Алгоритмы: построение и анализ = INTRODUCTION TO ALGORITHMS. — 2-е изд. — М.: «Вильямс», 2006. — С. 1296. — ISBN 0-07-013151-1.

58. Sauer, P.W. & HEYDT, GT. (1979). GENERALIZED STOCHASTIC POWER FLOW ALGORITHM. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 98. 7-7.

59. A technical oriented NTC/ATC user's guide, ETSO, March 2000

60. Van den Bergh, Kenneth & Boury, Jonas & Delarue, Erik. (2016). The Flow-Based Market Coupling in Central Western Europe: Concepts and definitions. *The Electricity Journal*. 29. 10.1016/j.tej.2015.12.004.
61. Rious, Vincent & Usaola, Julio & Sagan, Marcelo & Glachant, Jean-Michel & Dessante, Philippe. (2008). Assessing Available Transfer Capacity on a Realistic European Network: Impact of Assumptions on Wind Power Generation. HAL, Post-Print. 1 - 6. 10.1109/INFRA.2008.5439613.
62. Болотникова, О. В. Линейное программирование: симплекс-метод и двойственность : учеб. пособие / О. В. Болотникова, Д. В. Тарасов, Р. В. Тарасов. - Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 84 с. ISBN 978-5-906831-36-1
63. Дикин И. И. "Итерационное решение задач линейного и квадратичного программирования". Доклад Академии Наук СССР. 174 (1): 747–748, 1967.
64. Дикин И.И., Зоркальцев В.И. Итеративное решение задач для математического программирования (алгоритмы метода внутренних точек). – Новосибирск: Наука, 1980. – 143 с.
65. Зоркальцев В. И. "Метод внутренних точек в линейной оптимизации" Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика, №. 1, 2009, 207-220 с.
66. Зоркальцев В.И., Пержабинский С.М. Обоснование алгоритмов внутренних точек для задач оптимизации с нелинейными ограничениями // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. — Новосибирск, 2013. — Т. 16, No 1. — С. 27–38.
67. Зоркальцев В. И., Мокрый И. В., “Алгоритмы внутренних точек в линейной оптимизации”, Сиб. журн. индустр. матем., 21:1 (2018), 11–20; J. Appl. Industr. Math., 12:1 (2018), 191–199
68. Воеводин В.В. Параллельные вычисления. СПб., БХВ-Петербург, 2004.
69. Всё о мире суперкомпьютеров и параллельных вычислений [Электронный ресурс] // PARALLEL.RU – информационно-аналитический центр по параллельным вычислениям: [сайт]. URL: <http://www.parallel.ru> (дата обращения: 23.01.2022).

70. Массель Л. В., Геранюшкин А. А. "Разработка параллельной версии программного комплекса (ПК) для оценки надежности электроэнергетических систем на основе унаследованного ПК янтарь" Вестник Иркутского государственного технического университета, №3 (62), 2012, 11-17 с.
71. Полуботко Д.В., Чукреев Ю.Я., Чукреев М.Ю.. "Применение современных средств параллельных вычислений для анализа балансовой надежности электроэнергетических систем при планировании их развития" Программные продукты и системы, №2, 2013, 225-231 с.
72. Страуструп Б. Язык программирования C++. Специальное издание. М., ООО «Бином», ISBN: 978-5-6045724-6-7, 2022. 1216 с.
73. Campbell C., Miller A. Parallel Programming with Microsoft Visual C++: Design Patterns for Decomposition and Coordination on Multicore Architectures (Patterns & Practices). Microsoft Press, 2011. 208 с.
74. Demming R., Duffy D. Introduction to the Boost C++ Libraries; Volume I - Foundations. Datasim Education BV, 2010. 310 pp.
75. Demming R., Duffy D. Introduction to the Boost C++ Libraries; Volume II - Advanced Libraries. Datasim Education BV, 2012. 356 pp.
76. Schaling B. The Boost C++ Libraries. XML Press, 2011. 262 pp.
77. Quinn M. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. McGraw-Hill Education, 2008. 480 pp.
78. Blair-Chappell S., Stokes A. Parallel Programming with Intel Parallel Studio XE, Willey, ISBN: 978-0-470-89165-0, 2012, 552pp.
79. Хьюз К., Хьюз Т. Параллельное и распределённое программирование с использованием C++. М., Издательский дом "Вильямс", 2004. 672 с.
80. Робачевский А.М., Немнюгин С.А., Стестик О.Л. Операционная система UNIX. СПб., 2005. 656 с.
81. Таненбаум Э. Современные операционные системы. 4-е издание. СПб., Питер, ISBN: 978-5-496-00301-8, 2015. 1120 с.
82. Kovalev G. F., Lebedeva L. M. Reliability of Power Systems / Springer Cham; 1st ed. 2019, 237 p

83. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Чудный В.С. Расчет показателей балансовой надёжности с учетом переменной топологии электрической сети. // Электричество. 2016. № 4. С. 4-10.
84. Беляев Н.А., Егоров А.Е., Коровкин Н.В., Чудный В.С. Разработка моделей электроэнергетических систем для анализа надёжности обеспечения баланса мощности. Электрические станции. 2015. № 11 (1012). С. 47-53.
85. Васильев Ф. П. Методы оптимизации - Издательство «Факториал Пресс», 2002
86. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1970. — С. 575—576.
87. Пантелеев, А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учебное пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. - СПб.: Лань, 2015. - 512 с.
88. Storn, R.; Price, K.. "Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces". Journal of Global Optimization. **11** (4): 341–359. (1997) doi:10.1023/A:1008202821328. S2CID 5297867.
89. K. Price, R. Storn, J. Lampinen. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. Springer, 2005.
90. Банди Б. Методы Оптимизации. Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988.
91. Шукаев Д.Н. Прикладные методы оптимизации, Учебник. — М.: Академия Естествознания, 2017. — 212 с.
92. Учебное пособие «Методы оптимизации систем автоматизированного проектирования»: [Электронный ресурс] URL: http://www.optimizaciya-sapr.narod.ru/usl_wtraf/vnew.html (Дата обращения: 30.01.2022)
93. Армийо, Ларри (1966). «Минимизация функций, имеющих липшицевы первые частные производные». Pacific J. Math. 16 (1): 1–3. Дои:10.2140 / pjm.1966.16.1.
94. Методы линейного поиска. Численная оптимизация. Серия Springer по исследованию операций и финансовому инжинирингу. 2006. С. 30–32. Дои:10.1007/978-0-387-40065-5_3. ISBN 978-0-387-30303-1.

95. Storn, Rainer. (2008). Differential Evolution Research – Trends and Open Questions. 10.1007/978-3-540-68830-3_1.
96. Opara, Karol & Arabas, J. Comparison of mutation strategies in Differential Evolution – A probabilistic perspective. *Swarm and Evolutionary Computation*. 39. 10.1016/j.swevo.2017.12.007. (2018)
97. Qamar Abbasa, Jamil Ahmadb, Hajira Jabeenc, The analysis, identification and measures to remove inconsistencies from differential evolution mutation variants doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2017.43S.052
98. Georgioudakis, Manolis & Plevris, Vagelis. (2020). A Comparative Study of Differential Evolution Variants in Constrained Structural Optimization. *Frontiers in Built Environment*. 6. 10.3389/fbuil.2020.00102.
99. Noman, Nasimul & Bollegala, Danushka & Iba, Hitoshi. (2011). An Adaptive Differential Evolution Algorithm. 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation, CEC 2011. 2229 - 2236. 10.1109/CEC.2011.5949891.
100. Z. Guo, C. Bo, Y. Min, and B. Cao, “Self-adaptive chaos differential evolution,” in *In Proceedings of International Conference on Natural Computation (ICNC)*, 2006, pp. 972–975.
101. G. Yu, X. Wang, and P. Li, “Application of chaotic theory in differential evolution algorithms,” in *In Proceedings of International conference on Natural Computation (ICNC)*, 2010, pp. 3816–3820.
102. Zhang, Jingqiao & Sanderson, A.C... JADE: Adaptive Differential Evolution With Optional External Archive. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*. 13. 945 - 958. 10.1109/TEVC.2009.2014613. (2009)
103. *Адам Фримен. ASP.NET MVC 4 с примерами на C# 5.0 для профессионалов, 4-е издание = Pro ASP.NET MVC 4, 4th edition. — М.: «Вильямс», 2013. — 688 с. — ISBN 978-5-8459-1867-3.*
104. Python Bindings: Calling C or C++ From Python, Jim Anderson: [Электронный ресурс] URL: <https://realpython.com/python-bindings-overview/> (Дата обращения: 03.03.2022)

105. Абстрактные классы (C++), Jim Anderson: [Электронный ресурс] URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/cpp/cpp/abstract-classes-cpp?view=msvc-160> (Дата обращения: 10.03.2022)

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СВИДЕТЕЛЬСТВА О
РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017614029

Программно-вычислительный комплекс «Надёжность»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелentьева Сибирского отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Крупенёв Дмитрий Сергеевич (RU), Якубовский Дмитрий Викторович (RU), Бояркин Денис Александрович (RU)*

Заявка № 2016661553

Дата поступления 31 октября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 апреля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2017620403

**База данных схем электроэнергетических систем для
программно-вычислительного комплекса «Надёжность»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А.
Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
(RU)**

Авторы: **Крупенёв Дмитрий Сергеевич (RU), Якубовский Дмитрий
Викторович (RU), Бояркин Денис Александрович (RU)**

Заявка № 2016621444

Дата поступления 31 октября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 07 апреля 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019662426**Библиотека пакетной оптимизации**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Якубовский Дмитрий Викторович (RU), Крупенёв Дмитрий Сергеевич (RU), Бояркин Денис Александрович (RU)*

Заявка № **2019661407**Дата поступления **17 сентября 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **24 сентября 2019 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019662459

**Обработка ретроспективных данных о ремонтах
энергетического оборудования**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А.
Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
(RU)**

Авторы: **Бояркин Денис Александрович (RU), Якубовский Дмитрий
Викторович (RU), Крупенёв Дмитрий Сергеевич (RU)**

Заявка № 2019661411

Дата поступления 17 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 сентября 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019662460

Программный комплекс формирования графиков нагрузки

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (RU)*

Авторы: *Крупенёв Дмитрий Сергеевич (RU), Якубовский Дмитрий Викторович (RU), Бояркин Денис Александрович (RU)*

Заявка № 2019661410

Дата поступления 17 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 сентября 2019 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Министерство науки и высшего образования РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
им. Л.А.МЕЛЕНТЬЕВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИСЭМ СО РАН)



664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130

Тел. (3952) 42-47-00

Факс (3952) 42-67-96

E-mail: info@isem.irk.ru

<http://isem.irk.ru>

от 27.04.2022 № 153/15/32-18-02
на № _____ от _____

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Настоящим подтверждается, что результаты кандидатской диссертации Якубовского Дмитрия Викторовича «Модификация математических моделей и методов дифференциальной эволюции для решения задач минимизации дефицита мощности электроэнергетических систем» использовались при выполнении 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» и при выполнении работы «Разработка порядка определения величины нормативного резерва генерирующих мощностей в Единой энергетической системе России и изолированных энергосистемах» по договору № 2018/16 от 20 марта 2018 года между ИСЭМ СО РАН и Ассоциацией «НП Совет рынка».

В проектах использованы следующие результаты исследования:

- 1) разработанные и модифицированные модели минимизации дефицита мощности для оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем,
- 2) модифицированные методы дифференциальной эволюции;
- 3) внешняя динамически подключаемая библиотека оптимизации для минимизации дефицита мощности, интегрируемая в программный комплекс оценки балансовой надёжности ЭЭС.

Вышеперечисленные результаты диссертационного исследования Якубовского Дмитрия Викторовича приняты к использованию в деятельности Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

Заместитель директора
ИСЭМ СО РАН, д.т.н.



(подпись)

Сендеров С.М.

(Ф.И.О)