

На правах рукописи



Бояркин Денис Александрович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БАЛАНСОВОЙ НАДЁЖНОСТИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ОСНОВАННАЯ НА МЕТОДЕ
МОНТЕ-КАРЛО С ПРИМЕНЕНИЕМ КВАЗИСЛУЧАЙНЫХ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЧИСЕЛ И МЕТОДОВ МАШИННОГО
ОБУЧЕНИЯ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
Крупенёв Дмитрий Сергеевич

Иркутск – 2022

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

Научный руководитель: кандидат технических наук,
Крупенёв Дмитрий Сергеевич

Официальные оппоненты: **Куликов Александр Леонидович**
доктор технических наук, профессор, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «Автоматические локационные искатели мест повреждений», заместитель директора
Феоктистов Александр Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН), лаборатория параллельных и распределенных вычислительных систем, заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (ФГАОУ ВО СПбПУ)

Защита состоится «06» сентября 2022 г. в 09:00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, малый конференц-зал (к. 355).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте <https://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2022-7/>.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
д.т.н., профессор



А.М. Клер

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современная электроэнергетика характеризуется повышением требований к надёжности электроэнергетических систем (ЭЭС). Это связано со следующими основными причинами:

- развитие экономики и расширение областей применения электрической энергии приводит к росту общего уровня потребления электроэнергии, несмотря на сопутствующее развитие технологий по энергосбережению;
- широкое применение точной электроники в производстве и в быту, а также рост числа критических инфраструктур, зависящих от поставок электроэнергии, приводит к повышению требований к качеству и надёжности её обеспечения;
- увеличение доли возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ), характеризующихся зависимостью генерации электроэнергии от стохастических факторов природного характера, а также других элементов подобного типа, приводит к повышению неопределённости и усложнению управления и планирования развития ЭЭС.

Эти вызовы, в совокупности с другими традиционными задачами, диктуют требования к повышению адекватности показателей, получаемых при оценке надёжности ЭЭС, как для уровня функционирования, так и при перспективном планировании развития ЭЭС. В работе рассматриваются задачи оценки балансовой надёжности ЭЭС. Задачи обеспечения балансовой надёжности сводятся к анализу мероприятий по повышению её уровня. При этом выполняется решение задачи синтеза балансовой надёжности, где требуется многократное выполнение процедуры оценки в процессе поиска решения с соблюдением критериев надёжности. Скорость решения задачи синтеза балансовой надёжности в данном случае зависит от размера и структуры ЭЭС, вероятности возникновения дефицита мощности, полноты учета случайных факторов, влияющих на надёжность электроснабжения. Для сложных схем это может приводить к существенным временным затратам и значительному затруднению в использовании результатов при синтезе надёжности и других последующих задачах.

Одним из основных методов решения сложных задач, к которым относится оценка балансовой надёжности ЭЭС, в силу их размерности, является имитационное моделирование методом Монте-Карло. Метод Монте-Карло заключается в создании вероятностной модели изучаемого процесса и многократном получении реализаций случайной величины, его характеризующей. Математическое ожидание этих реализаций является искомым значением. Для достижения высокой точности результата необходимо значительное количество таких реализаций, что приводит к большим временным затратам на получение решения. Необходимость в относительно быстром решении задач большой размерности приводит к актуальности разработки таких методов и подходов к модификации метода Монте-Карло, которые бы позволили сократить время его работы и, соответственно, время решения задач, для которых он применяется, но при этом не повлияли на точность получаемых оценок.

Наряду с увеличением скорости расчёта, значительно повышается и эффективность применения показателей надёжности в реальных технических задачах. Поэтому для повышения вычислительной эффективности оценки балансовой надёжности ЭЭС методом Монте-Карло необходима модернизация и совершенствование методики оценки балансовой надёжности ЭЭС на его основе.

В диссертационной работе предлагается усовершенствование методики, основанной на методе Монте-Карло, применительно к задаче оценки балансовой надёжности ЭЭС за счёт применения квазислучайных последовательностей чисел и методов машинного обучения; разработка алгоритмической модели оценки балансовой надёжности ЭЭС с применением разработанных численных методов; применение полученных результатов в программном комплексе «Надёжность», разработанном для оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем.

Степень разработанности проблемы

Исследованию проблем оценки балансовой надёжности ЭЭС уделяется большое внимание, начиная с момента появления крупных энергообъединений. Наиболее существенный вклад в развитие данной области внесли: Ю.Н. Руденко, Г.А. Волков, В.Г. Китушин, Г.Ф. Ковалёв, Ю.Н. Кучеров, Н.А. Манов, В.В. Могирев, В.П. Непомнящий, В. А. Обоскалов, М.Н. Розанов, И.А. Ушаков, М.Б. Чельцов, Ю.Я Чукреев, Р. Алан (R. Allan), Р. Биллингтон (R. Billington), В. Ли (W. Li) и др.

Среди исследователей, занимавшихся методами повышения вычислительной эффективности метода Монте-Карло, можно выделить следующих: И.М. Соболев, С.М. Ермаков, Н.К. Метрополис, Р.Э. Кафлиш, Г.С. Фишман и др. в том числе с применением квазислучайных чисел И.М. Соболев, Г. Нидеррайтер (H. Niederreiter), Д. Холтон (J. Halton), Й. Ван дер Корпут (J. G. van der Corput) и др.

Применение методов машинного обучения в методе Монте-Карло освещено несколько хуже, как правило, авторы, наоборот, применяют методы Монте-Карло в методах машинного обучения или решают прикладные задачи. Вопросами применения методов машинного обучения для улучшения метода Монте-Карло занимались такие исследователи как Н. Гётц (N. Götz), С. Форман (S. Foreman) Д. Саррут (D. Sarrut) и др.

Цель работы

Целью работы является разработка эффективной методики оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем, основанной на методе Монте-Карло с применением квазислучайных последовательностей и методов машинного обучения.

Задачи работы

1. Разработать алгоритмическую модель оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем, основанную на методе Монте-Карло;
2. Модернизировать процедуру формирования случайных состояний электроэнергетических систем при применении метода Монте-Карло за счет использования квазислучайных последовательностей чисел.
3. Разработать методику оценки балансовой надёжности ЭЭС, основанную на методе Монте-Карло с применением методов машинного обучения

для: классификации дефицитных и бездефицитных состояний, определения системных дефицитов мощности, определения дефицитов мощности для зон надёжности.

4. Разработать программный комплекс для оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем методом Монте-Карло с применением эффективных генераторов случайных чисел и усовершенствованной методикой на основании методов машинного обучения.

5. Провести серию расчетов для апробации разработанных модели, методов и программного комплекса на тестовых и реальных схемах электроэнергетических систем разной размерности.

Объект исследования

Электроэнергетические системы большой размерности со сложной структурой, представленные в виде математических моделей, обеспечивающих возможность их исследования с точки зрения балансовой надёжности.

Предмет исследования

Предметом данной работы является методика оценки балансовой надёжности сложных ЭЭС методом Монте-Карло, при использовании которой возникает проблема повышенных временных затрат.

Научная новизна

Научная новизна заключается в повышении вычислительной эффективности методики оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем методом Монте-Карло, которое основано на следующих новых результатах:

- Разработана алгоритмическая модель оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем, предназначенная для повышения вычислительной эффективности соответствующей методики, основанной на методе Монте-Карло;
- Проведена модернизация процедуры формирования случайных состояний электроэнергетических систем при применении метода Монте-Карло за счет использования квазислучайных последовательностей чисел, которая позволила снизить число анализируемых случайных состояний системы при соблюдении критерия точности, по сравнению с уже используемыми для решения этой задачи генераторами случайных чисел;
- Разработана методика оценки балансовой надёжности ЭЭС, основанная на методе Монте-Карло с применением методов машинного обучения для: классификации дефицитных и бездефицитных состояний, определения системных дефицитов мощности и определения узловых дефицитов мощности, что позволило повысить вычислительную эффективность процесса оценки балансовой надёжности;
- Разработан программный комплекс, предназначенный для математического моделирования ЭЭС, оценки балансовой надёжности ЭЭС;
- Разработаны детальные математические модели тестовых и реальных электроэнергетических систем для выполнения оценки балансовой надёжности методом Монте-Карло. Модели учитывают процессы и внешние возмущения, происходящие при работе реальных систем.

Вычислительная эффективность подтверждается сокращением длительности расчёта показателей балансовой надёжности ЭЭС при использовании результатов настоящей работы.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в повышении вычислительной эффективности методики оценки балансовой надёжности, основанной на методе Монте-Карло. Модернизированная методика может быть использована в различных практических задачах связанных с моделированием сложных систем, так как она позволяет сократить время их решения за счёт сокращения числа необходимых генерируемых случайных состояний моделируемой системы до достижения требуемой точности результата и сокращения времени выполнения расчёта за счет применения более эффективных методов машинного обучения и квазислучайных последовательностей.

Практическая значимость работы

Разработанные подходы и алгоритмы применены при разработке программного комплекса «Надёжность», предназначенного для моделирования работы ЭЭС и решения задач оценки балансовой надёжности. С его помощью выполнены специализированные расчёты для схем реальных ЭЭС, в том числе при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка порядка определения величины нормативного резерва генерирующих мощностей в Единой энергетической системе России и изолированных энергосистемах» по договору 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 по следующим пунктам:

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.

П.7. Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели.

Методы и средства исследования

Математический анализ, теория математического и компьютерного моделирования, технологии объектно-ориентированного программирования, численные методы, методы машинного обучения, метод Монте-Карло, метод

квази-Монте-Карло, алгоритмы генерации псевдослучайных последовательностей чисел, алгоритмы генерации квазислучайных последовательностей чисел и др.

Положения, выносимые на защиту

1. Алгоритмическая модель оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем.
2. Модификация процедуры формирования случайных состояний электроэнергетических систем при применении метода квази-Монте-Карло.
3. Модификация методики оценки балансовой надёжности на основании метода Монте-Карло с помощью применения методов машинного обучения.
4. Программный комплекс для оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем методом Монте-Карло с применением эффективных генераторов случайных чисел и усовершенствованной методикой на основании методов машинного обучения.
5. Результаты расчетов, выполненные с помощью разработанных модели, методов и программного комплекса на тестовых и реальных схемах электроэнергетических систем разной размерности.

Личный вклад

Результаты, приведенные в положениях, выносимых на защиту, а также их программная реализация получены лично автором. Формулировки задач и направлений исследований, интерпретация их результатов, а также теоретические обобщения методов оценки балансовой надёжности 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:

1. 88е заседание международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики», Сыктывкар, Россия, 2016;
2. 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, Russia, 2017;
3. XLVIII конференция-конкурс научной молодёжи «Системные исследования в энергетике», г. Иркутск, Россия, 2018;
4. XXIII Байкальская всероссийская конференция «Информационные и математические технологии в науке и управлении», п. Курма, Россия, 2018;
5. 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Tomsk, Russia, 2019;
6. 92е заседание международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики», Казань, Россия, 2020;

7. 93е заседание международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики», Волжский, Россия, 2021;

8. ISSE 2021 - 7th IEEE International Symposium on Systems Engineering, Vienna, Austria, 2021.

Предполагаемые формы внедрения ожидаемых результатов

Использование программного комплекса для оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем при анализе реальных ЭЭС.

Публикации

По результатам исследования научно-квалификационной работы опубликованы 22 статьи, в том числе 2 в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.13.18 (технические науки), 15 в журналах, индексируемых Web of Science, Scopus (в том числе 2 статьи в журналах Q1), получено 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ и базы данных.

Объем и структура работы

Диссертационная работа содержит введение, 3 главы, заключение и 3 приложения. Текст научно-квалификационной работы изложен на 167 страницах, содержит 42 рисунка и 17 таблиц. Список использованных литературных источников включает 115 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассматривается состояние вопроса оценки балансовой надёжности ЭЭС в современное время. В частности, произведен обзор методов и моделей для решения данной задачи; выполнен обзор литературных источников, научных и коммерческих решений. В первой главе также представлен теоретический обзор методов генерации случайных чисел и методов машинного обучения.

При планировании развития ЭЭС необходимо анализировать перспективные состояния ЭЭС на предмет обеспечения баланса мощности при учёте негативных факторов функционирования. Для этого выполняется решение задачи оценки балансовой надёжности ЭЭС, заключающейся в получении показателей, характеризующих балансовую надёжность ЭЭС. Основным подходом к решению задачи оценки балансовой надёжности является применение методики, основанной на методе Монте-Карло. Укрупнённо эту методику можно представить в виде двух основных вычислительных этапов:

- этап многократного формирования случайных состояний ЭЭС и выполнение задачи минимизации дефицита мощности для каждого такого состояния;

- этап вычисления показателей балансовой надёжности ЭЭС.

При моделировании сложных систем методом Монте-Карло для достижения результата с заданной точностью обычно требуется расчёт большого количества случайных состояний, что влияет на скорость проведения оценки. Низкая скорость расчёта может неблагоприятно сказаться на применимости этого подхода. Усовершенствование процедур, реализованных в рамках метода Монте-Карло, позволяющих повысить его вычислительную эффективность в решении задач моделирования, является важной проблемой, требующей решения.

Во второй главе представлено подробное описание методики оценки балансовой надёжности ЭЭС, основанной на методе Монте-Карло, и её алгоритмическая модель. Выполнен анализ проблемы скорости и точности при решении задач с помощью данной методики; определены основные методы и подходы, направленные на выполнение модернизации метода Монте-Карло, применяемого в методике оценки балансовой надёжности ЭЭС; выполнен теоретический анализ этих методов и подходов.

Алгоритмическая модель оценки балансовой надёжности ЭЭС представляет следующую последовательность действий:

А. Моделирование неслучайных событий, происходящих в ЭЭС. Моделирование регулярных событий проводится для соответствующего каждого часа расчётного периода.

На основании ретроспективной информации формируются почасовые графики нагрузки в зонах надёжности в относительных единицах. Эти графики представляются в виде коэффициентов нагрузки относительно максимумов для характерных временных периодов (месяцы, недели, сутки). Коэффициенты нагрузки так же учитывают тип дня – рабочий или выходной (праздник). Далее по формуле определяются перспективные значения нагрузки для каждого расчётного часа:

$$\bar{y}_i^h = y_{i,h(y)}^{max} * d_{i,h(m)} * d_{i,h(d)} * d_{i,h(h)} * d_{i,h(t)}, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, I, h = 1, \dots, H,$$

где \bar{y}_i^h – нагрузка в зоне надёжности i для заданного часа и даты h , МВт; h – заданная дата и время; I – число зон надёжности в рассматриваемой ЭЭС; H – количество часов в расчётном периоде; $h(y)$ – номер года; $h(m)$ – номер месяца; $h(d)$ – номер дня; $h(h)$ – номер часа; $h(t)$ – тип дня; $d_{i,h}$ – соответствующие средние коэффициенты нагрузки для часа, дня, типа дня и месяца; $y_{i,h(y)}^{max}$ – максимальная величина нагрузки в зоне надёжности i для заданного года $h(y)$, МВт.

Определяется уровень располагаемой мощности генераторов для каждой из зон надёжности с учётом ограничений мощности природного сезонного характера и плановыми ремонтами.

Моделирование природных ограничений электростанций в виде максимумов генерации для заданных дат определяется статистическими методами на основе данных из многолетних наблюдений:

$$\bar{x}_{s,h}^{max} = \begin{cases} \bar{x}_s^{maxt}, & \text{если } \bar{x}_s^{maxt} \leq \bar{x}_{s,h}^{maxs} \\ \bar{x}_{s,h}^{maxs}, & \text{если } \bar{x}_{s,h}^{maxs} \leq \bar{x}_s^{maxt} \end{cases}, \quad s = 1, \dots, S, h = 1, \dots, H, \quad (2)$$

где $\bar{x}_{s,h}^{max}$ – располагаемая мощность генерации для станции s для заданной даты и времени h , МВт; h – заданная дата и время; S – число станций в рассматриваемой системе; H – количество часов в расчётном периоде; \bar{x}_s^{maxt} – располагаемая генерирующая мощность станции s , МВт; $\bar{x}_{s,h}^{maxs}$ – располагаемая генерирующая мощность станции s с учётом природных ограничений генерации для заданной даты и времени h , МВт.

Таким образом ограничение генерации в зоне надёжности для заданного часа определяется следующей суммой:

$$\bar{x}_i^h = \sum_{s=1}^{S_i} \bar{x}_{s,h}^{max}, \quad i = 1, \dots, I, h = 1, \dots, H, \quad (3)$$

где S_i – число станций в рассматриваемой зоне надёжности i .

Плановые ремонты генерирующего оборудования моделируются путём заполнения сезонных провалов графика нагрузки при моделировании работы ЭЭС. Для этого определяется объем недополученной в результате ремонтов мощности за годовой интервал работы для каждой зоны надёжности, МВт*ч:

$$V_i^{\text{рем}} = \sum_{a=1}^{A_i} x_a * m_{x_a} * 24, \quad i = 1, \dots, I, \quad (4)$$

где x_a – мощность генерирующего агрегата, МВт; m_{x_a} – объем плановых ремонтов за год в сутках для агрегата x_a ; A_i – общее число генерирующих агрегатов в зоне надёжности. Далее проводится заполнение сезонных провалов графиков нагрузки каждой зоны надёжности советующим значением недополученной мощности. После «встраивания» объема ремонтной мощности в график нагрузки для каждого расчетного часа определяется величина дополнительной нагрузки, которая учитывает плановые ремонты генерирующего оборудования $V_i^{\text{рем},h}$, МВт.

В. Моделирование вероятностных событий.

На данном этапе формируются расчётные состояния ЭЭС, которые характеризуются набором событий, моделируемых случайным образом. К таким событиям, относятся отказы генерирующих агрегатов и линий электропередачи (ЛЭП), нерегулярные колебания нагрузки потребителей и др. Математически моделирование одного случайного события $K_n, n = 1, \dots, N$, вероятность которого равна $p_n, n = 1, \dots, N$, происходит при получении случайного числа $r_n, n = 1, \dots, N$, из равномерно распределенного множества на интервале $[0,1]$. Распределенное множество представляет собой последовательность случайных чисел, сгенерированных с помощью генераторов псевдослучайных или квазислучайных чисел (ГПСЧ и ГКСЧ соответственно).

Если моделируемое событие бинарное, то разыгрывание выполняется следующим образом. Если случайное число r_n , находится в интервале $[0, p_n]$, то считается, что событие наступило, в противном случае, что не наступило, т.е.

$$K_n = \begin{cases} 1, & \text{если } r_n \in [0, p_n] \\ 0, & \text{если } r_n \in (p_n, 1] \end{cases} \quad n = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Определение величины колебаний нагрузки выполняется по следующей формуле:

$$\bar{y}_i^{h,n} = \bar{y}_i^h + p_y^h * (0,5 - r_n) * \bar{y}_i^h, \quad i = 1, \dots, I, h = 1, \dots, H. \quad (6)$$

где \bar{y}_i^h – нагрузка в зоне надёжности i для заданного часа и даты h , МВт; I – число зон надёжности в рассматриваемой системе; p_y^h – среднее квадратическое отклонение нагрузки для заданной зоны надёжности i для заданного часа h , % (p_y^h определяется путем статистической обработки репрезентативной ретроспективной выборки значений нагрузки); H – количество расчётных часов.

С. Решение задачи минимизации дефицита мощности для расчётных состояний ЭЭС.

Для известных значений работоспособных генераторных мощностей, требуемых уровней нагрузок потребителей, пропускных способностей межзонных связей ЭЭС и коэффициентов потерь мощности в связях ЭЭС необходимо определить дефициты мощности в ЭЭС, а также уровень загрузки генерации и сетевых объектов в ЭЭС. Рассмотрим модель потокораспределения с квадратичными потерями мощности при её передаче:

Для каждого часа $h = 1, \dots, H$ расчётного периода требуется выполнить расчёт $n = 1, \dots, N$ состояний ЭЭС, полученных в результате выполнения шагов A и B настоящего алгоритма. Требуется найти:

$$\sum_{i=1}^I y_i^{h,n} \rightarrow \max, \quad (7)$$

учитывая балансовые ограничения

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

и линейные ограничения-неравенства на переменные

$$\begin{aligned} 0 &\leq y_i^{h,n} \leq \bar{y}_i^{h,n} + V_i^{\text{рем},h} \\ \tilde{x}_i^h &\leq x_i^{h,n} \leq \bar{x}_i^h \\ 0 &\leq z_{ij}^{h,n} \leq \bar{z}_{ij}^h \\ 0 &\leq z_{ji}^{h,n} \leq \bar{z}_{ji}^h \\ z_{ij}^{h,n} * z_{ji}^{h,n} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$h = 1, \dots, H, n = 1, \dots, N, i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, I, i \neq j,$$

где H – количество расчётных часов; N – количество состояний для каждого расчётного часа; $x_i^{h,n}$ – используемая генерирующая мощность в зоне надёжности I , МВт; \bar{x}_i^h – располагаемая генерирующая мощность в зоне надёжности i , МВт; \tilde{x}_i^h – минимальная рабочая генерирующая мощность в зоне надёжности i , МВт; $y_i^{h,n}$ –

обеспеченная нагрузка в зоне надёжности i , МВт; $\bar{y}_i^{h,n}$ – требуемая для обеспечения нагрузка в зоне надёжности i , МВт; $V_i^{\text{рем},h}$ – величина дополнительной нагрузки, учитывающей компенсацию плановых ремонтов генерирующего оборудования в зоне надёжности i , МВт; $z_{ij}^{h,n}$ – поток мощности из зоны надёжности i в зону надёжности j , МВт; $z_{ji}^{h,n}$ – поток мощности из зоны надёжности j в зону надёжности i , МВт; \bar{z}_{ij}^h – пропускная способность межзональной связи между зонами надёжности i и j , МВт; a_{ji} – заданные коэффициенты удельных потерь мощности при её передаче из зоны надёжности j в зону надёжности i .

Задача на основании представленной модели (7)-(9) решается с помощью оптимизационных методов.

D. Этап статистического анализа (вычисление показателей балансовой надёжности ЭЭС)

На данном этапе выполняется статистический анализ совокупности данных, полученных на этапе минимизации дефицита мощности C . В результате анализа определяется значение показателей, характеризующих балансовую надёжность ЭЭС.

При решении задач методом Монте-Карло точность вычислений Δ определяется на основании зависимости:

$$\Delta = \sqrt{D\zeta/N}, \quad (10)$$

где $D\zeta$ – дисперсия моделируемой методом Монте-Карло случайной величины ζ , N – число испытаний.

Выражение (10) показывает зависимость порядка ошибки между величинами $D\zeta$ и N . С одной стороны, для повышения точности необходимо увеличивать N , что влечет за собой увеличение времени расчёта. С другой стороны, одну и ту же задачу можно решать различными вариантами метода Монте-Карло, которым отвечают различные значения $D\zeta$.

Скорость сходимости и точность работы метода Монте-Карло на практике зависит от нескольких факторов в соответствии с зависимостью (10):

1) *Качества последовательностей используемых случайных чисел.* Если генератор случайных чисел выдает числа неравномерно, то результат решения задачи может оказаться неверным или скорость сходимости метода Монте-Карло будет замедленной. Поэтому проблема использования эффективного генератора случайных чисел (ГСЧ) является актуальным вопросом. Был проведён теоретический анализ различных ГСЧ. К наиболее используемым ГПСЧ относятся Вихрь Мерсенна, Xorshift, PCG и их производные. К ГКСЧ, генерирующим неслучайные последовательности в угоду более хорошим свойствам равномерной распределённости, относятся последовательности Холтона, Нидеррайтера и ЛП-последовательности. Этот анализ заключался в том числе в проведении статистического теста с помощью критерия Колмогорова-Смирнова, результат проведения которого представлен в таблице 1. В соответствии с данным тестом степень случайности равномерно распределённых случайных чисел тем выше, чем ближе значение критерия к 0,87.

Таблица 1. Значения критерия Колмогорова-Смирнова для последовательностей чисел.

Тип	ГПСЧ			ГКСЧ		
	Вихрь Мерсенна	PCG	Xorshift	ЛП _τ	Холтон	Хаммерсли
λ	0,935	0,565	0,32	~0,87	~0,87	~0,87

По результатам проведённого анализа и, как видно из таблицы, было определено, что анализируемые ГСЧ достаточно близки по характеристикам (значения критерия всех анализируемых ГКСЧ примерно равен 0,87), а их официальные метрики плохо интерпретируемы, оценить их качество возможно только по результатам экспериментальных исследований.

2) *Скорость решения задачи минимизации дефицита мощности.* Наиболее времязатратным этапом в процессе решения задачи оценки балансовой надёжности является решение задачи минимизации дефицита мощности. Предлагается решить проблему больших временных затрат этапа с помощью применения методов машинного обучения, что позволит ускорить работу всей методики оценки балансовой надёжности, основанной на методе Монте-Карло. Для этого будут использованы следующие типы задач: классификации, регрессии и многозадачной регрессии.

Рассмотрим общий подход модификации, представленный на рисунке 1.



Рисунок 1 – Подход к модернизации методики оценки балансовой надёжности методом Монте-Карло

Общее число случайных состояний N , формируемых для расчёта минимума дефицита мощности на шаге A и B , разделяется на два набора N_L и N_P . Первый, при этом, меньше, чем второй, для него применяемые методы оптимизации для определения дефицита мощности на шаге C сохраняются, за исключением того факта, что как результат этого расчёта, так и само описание состояния будет формировать обучающую выборку S . Размер обучающей выборки при этом варьируется и определяется с помощью оценки точности методов машинного обучения на этапе её формирования C .

На основании полученной обучающей выборки на следующем этапе формируется алгоритм машинного обучения на шаге *С1*, задача которого получить результаты аналогичные тем, что вычисляются с помощью оптимизационных методов для второго набора случайных состояний вместо *С*. При этом ожидается, что общее затрачиваемое время на расчёт минимума дефицитов мощности для первого набора состояний, формирование обучающей выборки, формирование и настройку модели машинного обучения и на получение результатов для второго набора состояний будет меньше, чем расчёт только методами оптимизации для всех состояний в целом. Также ожидается, что точность алгоритма будет сохранена на уровне решения методами оптимизации.

Выбор самого метода машинного обучения зависит от характеристики решаемой задачи, выбора типа задачи к которому она сводится и от свойств самого метода. При анализе методов было определено, что все методы значительно отличаются друг от друга и то, что заведомо точно определить какой из них будет лучше без оценки на практике невозможно. Поэтому проанализированные методы линейной регрессии, метода опорных векторов, случайного леса, градиентного бустинга будут рассмотрены в экспериментальных исследованиях.

В третьей главе рассмотрены этапы создания программного комплекса «Надежность» для имитационного моделирования работы ЭЭС с целью оценки балансовой надёжности. Предлагаемые в данной работе методы для ускорения процесса расчёта показателей были реализованы и протестированы в представленном программном комплексе.

На рисунке 2 показана структура классов программного комплекса.

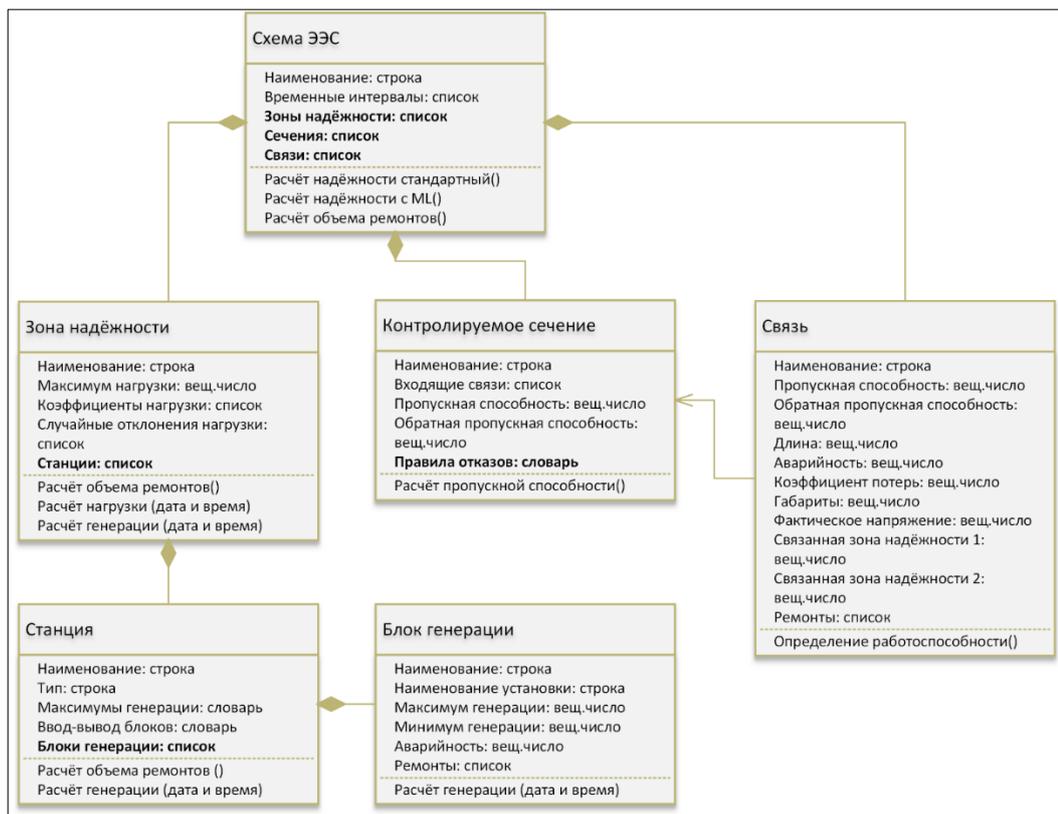


Рисунок 2 – Структура классов имитационной модели в программном комплексе

Программный комплекс также реализует саму методику оценки балансовой надёжности ЭЭС с помощью метода Монте-Карло, включая представленные в работе предложения по её улучшению. Для оценки предлагаемых подходов и выбора наиболее эффективных методов генерации случайных чисел и методов машинного обучения была выполнена серия расчётов на схемах ЭЭС разной размерности и сложности – от наиболее простой трёхзонной схемы ЭЭС, далее на 24-зонной схеме ЭЭС (IEEE RTS-96) и на заключительном этапе на 92-зонной схеме ЭЭС (Единой энергосистемы (ЕЭС) России).

Для оценки последовательностей случайных чисел выполнен расчёт с лимитом 10000 расчётных состояний одного режима для каждой схемы, определен дефицит мощности. Из ГПСЧ анализировались генераторы Вихрь Мерсенна, Xorshift, PCG, из ГКСЧ Холтон, Хаммерсли и ЛП_т-последовательности. Рассмотрим число состояний, которые были рассчитаны до достижения критерия останова и время, необходимое для этого (Таблица 2).

Таблица 2. Число испытаний и время расчёта математического ожидания дефицита мощности одного режима до достижения критерия останова для каждой схемы (сек.).

Система	Класс метода	ГПСЧ			LDS		
		МТ	PCG	Xorshift	ЛП _т	Холтон	Хаммерсли
Трёхзонная схема	Число испытаний	900	1550	800	950	850	450
	Время расчёта	1,587	3,65	1,907	2,42	3,234	2,169
RTS-96	Число испытаний	2450	3000	3250	2150	3700	2950
	Время расчёта	13,5	16,86	18,48	12,62	26,37	22,7
ЕЭС России	Число испытаний	10000	7700	5950	4700	8500	4900
	Время расчёта	310,42	262,7	193,84	161,29	306,03	177,54

Как видно из таблицы использование ГКСЧ позволяет быстрее достичь значения критерия останова при расчёте, не смотря на более медленную генерацию последовательности чисел. При этом с ростом сложности ЭЭС разница между ГПСЧ и ГКСЧ возрастает. Так, при расчёте трёхзонной схемы ГПСЧ выполняют расчёт быстрее на 26%, но в расчёте ЕЭС России, состоящей из 92 зон надёжности, ГКСЧ дают прирост в 17% по сравнению с наиболее эффективным Xorshift. Учитывая тот факт, что потребность в повышении вычислительной эффективности, в первую очередь, возникает у сложных схем, можно сделать вывод, что ГКСЧ и, в частности, генератор ЛП_т-последовательностей, повышают эффективность расчёта оценки балансовой надёжности методом Монте-Карло.

На следующем этапе была проверена эффективность модернизированной методики оценки балансовой надёжности методом Монте-Карло с помощью методов машинного обучения. Решение задачи с помощью методов классификации и методов регрессии показало свою эффективность, но при расчёте показателей балансовой надёжности требуется получение не только системного дефицита, но и дефицита в отдельных зонах надёжности, а также другие характеристики, например, перетоки мощности в связях и загрузка генерирующего оборудования в

зонах надёжности. Классификация и регрессия не позволяют получить множество ответов, но это позволяет сделать многозадачная регрессия.

Для оценки вычислительной эффективности модернизированной методики и определения наиболее эффективного метода машинного обучения для предлагаемого подхода были произведены расчёты дефицита мощности с лимитом 10000 состояний одного режима для каждой из анализируемых схем ЭЭС и каждого применённого в методике метода машинного обучения, а именно линейной регрессии, метода опорных векторов, случайного леса, градиентного бустинга. Рассмотрим число состояний, которые были рассчитаны до достижения критерия останова и время, необходимое для этого (Таблица 3).

Таблица 3. Число испытаний и время расчёта математического ожидания дефицита мощности одного режима до достижения критерия останова для каждой схемы (сек.).

Система	Метод	Линейная регрессия	Метод опорных векторов	Случайный лес	Градиентный бустинг
Трёхзонная схема	Число испытаний	650	650	850	400
	Время расчёта	1,896	2,118	7,633	1,232
RTS-96	Число испытаний	2350	3450	1350	2350
	Время расчёта	11,6	64,44	27,61	12,31
ЭЭС России	Число испытаний	6350	8250	10000	7350
	Время расчёта	146,11	391,83	589,04	180,06

Как видно из таблицы 3 при использовании методов машинного обучения число испытаний, необходимых для достижения критерия останова возросло по сравнению с расчётами без использования методов машинного обучения (Таблица 2). Однако, сокращение общего времени расчёта позволило компенсировать этот негативный фактор. Наиболее эффективные методы машинного обучения показывают прирост скорости относительно наиболее эффективных расчётов без применения методов машинного обучения на 22% для трёхзонной схемы, 8% для RTS-96 и 9% для ЭЭС России. При этом стоит учитывать, что при расчёте модифицированной методикой в качестве генератора случайных чисел был использован генератор ЛП_т-последовательностей. В число наиболее эффективных методов машинного обучения входит линейная регрессия и градиентный бустинг. Отклонение значений математических ожиданий минимума дефицита мощности во всех трёх ЭЭС сохраняется в пределах 5% от эталонных, полученных при расчёте без использования методов машинного обучения, что является достаточным, причём это отклонение распространяется и на другие прогнозируемые параметры, такие как дефицит в отдельных зонах, загруженность связей.

Таким образом на основании исследований, проведенных с помощью разработанного программного комплекса «Надёжность», выявлено, что, во-первых, применение квазислучайных чисел приводит к повышению скорости сходимости метода Монте-Карло и сокращению временных затрат на проведение расчётов в целом, особенно эта разница становится заметной при расчёте больших

схем, таких как ЕЭС России. Во-вторых, при использовании модернизированной методики оценки балансовой надёжности ЭЭС методом Монте-Карло с применением методов машинного обучения, возрастает скорость выполнения расчёта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Проведённый анализ ситуации в области оценки балансовой надёжности ЭЭС методом Монте-Карло показал существование сложности его применения, связанной с большими временными затратами, вызванными необходимостью анализа большого числа расчётных состояний. Эта проблема приводит к ограничению области применимости указанного подхода.

В диссертации предлагается модернизированный вариант методики оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем, основанной на методе Монте-Карло, позволяющий значительно повысить её вычислительную эффективность. Данный подход реализован в виде специализированного программного комплекса. В том числе, были получены следующие результаты:

1. Выполнена разработка алгоритмической модели оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем, основанной на методе Монте-Карло;
2. Выполнена модернизация процедуры формирования расчётных состояний электроэнергетических систем при применении метода Монте-Карло за счет использования квазислучайных последовательностей чисел.
3. Выполнена разработка методики оценки балансовой надёжности ЭЭС, основанной на методе Монте-Карло с применением методов машинного обучения для классификации дефицитных и бездефицитных состояний, определения системных дефицитов мощности, определения зонных дефицитов мощности.
4. Выполнена разработка программного комплекса «Надёжность» для оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем методом Монте-Карло с применением эффективных генераторов случайных чисел и усовершенствованной методикой на основании методов машинного обучения.
5. Выполнено тестирование предлагаемой методики и генераторов случайных чисел с использованием трёх схем ЭЭС, включая ЕЭС России, подтверждающее правильность теоретических заключений и более высокую эффективность выполнения оценки балансовой надёжности ЭЭС с точки зрения скорости расчёта по сравнению с традиционной методикой без использования методов машинного обучения.

В результате выполнения вышеперечисленных задач была достигнута цель диссертационной работы – разработана эффективная методика оценки балансовой надёжности электроэнергетических систем, основанная на методе Монте-Карло с применением квазислучайных последовательностей и методов машинного обучения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

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

1. 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.

2. 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.

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

1. 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.egyr.2021.07.022.

2. 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

3. 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.

4. 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.ress.2020.107171.

5. 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.

6. 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.

7. 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 надежности больших систем энергетики. Материалы 93-его заседания семинара. В 2-х книгах С. 149-158.

8. Pyatkova N., Boyarkin D. Methodical aspects of the energy industries interconnected operation modeling at the energy security research under modern conditions // E3S Web of Conferences, 2020, 209, 06016. DOI: 10.1051/e3sconf/202020906016.

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

10. Boyarkin D., Krupenev D., Iakubovskii 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.

11. Boyarkin D., Krupenev D., Iakubovskii D. Prediction of the power shortage in the electric power system by means of regression analysis by machine learning methods / 2019 International conference of young scientists on energy systems research, ESR 2019 Irkutsk, 27-29 may 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201911403003.

12. 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.

13. Boyarkin D., Iakubovskii D.; Komendantova N., Rovenskaya E.; Krupenev 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. DOI:10.3390/geosciences9010054.

14. 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.

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

Статьи в других изданиях:

1. Крупенёв Д.С., Бояркин Д.А., Якубовский Д.В. Оптимизация балансовой надёжности электроэнергетических систем с применением алгоритма марковской цепи Монте-Карло // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы 93-го заседания семинара. В 2-х книгах С. 146-155. (Scopus)

2. 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.

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

4. 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 надежности больших систем энергетики. Материалы 92-го заседания семинара. В 3-х книгах С. 149-158.

5. 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 надежности больших систем энергетики. Материалы 93-его заседания семинара. В 2-х книгах С. 149-158.

6. Бояркин Д.А., Крупенев Д.С., Якубовский Д.В. 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

7. Бояркин Д.А., Крупенёв Д.С., Якубовский Д.В. Использование методов машинного обучения для определения дефицитов мощности электроэнергетических систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. № 4 (12). С. 61-69.

8. Бояркин Д.А., Классификация состояний электроэнергетической системы при оценке балансовой надёжности методом Монте-Карло / Системные исследования в энергетике, Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып. 48, 2018.

9. Бояркин Д.А., Модернизация метода статистических испытаний для повышения эффективности оценки надежности электроэнергетических систем / Системные исследования в энергетике, Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН, Вып. 47, 2017.

СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ И БАЗЫ ДАННЫХ

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

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

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

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

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