Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего образования
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

На правах рукописи

Комарова Любовь Александровна

МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАТИВНО-ВЫЕЗДНЫМИ БРИГАДАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — Тимошенко Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор

Москва – 2026

Диссертация представлена к публичному рассмотрению и защите в порядке, установленном ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» в соответствии с предоставленным правом самостоятельно присуждать ученые степени кандидата наук, ученые степени доктора наук согласно положениям пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Публичное рассмотрение и защита диссертации состоятся 9 февраля 2027 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Финансового университета Д 505.001.126 по адресу: Москва, Ленинградский проспект, д. 51, корп.1, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в диссертационном зале Библиотечно-информационного комплекса ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» по адресу: 125167, Москва, Ленинградский проспект, д. 49/2, комн. 100 и на официальном сайте Финансового университета в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: www.fa.ru.

Персональный состав диссертационного совета:

председатель – Шевцов В.А., д.техн.н., профессор;
заместитель председателя – Рябов П.Е., д.физ.-мат.н., доцент;
ученый секретарь – Прокопчина С.В., д.техн.н., профессор;

члены диссертационного совета:
Кочкаров А.А., д.техн.н., доцент;
Судаков В.А., д.техн.н., профессор;
Тимошенко А.В., д.техн.н., профессор;
Фархадов М.П., д.техн.н., с.н.с.

Автореферат диссертации разослан 13 ноября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Финансового университета Д 505.001.126 С.В. Прокопчина

I Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Практика эксплуатации распределенных сетей показывает, что существующие методы управления оперативно-выездными бригадами (далее – ОВБ), как правило, основаны на классических задачах маршрутизации, либо как набор итеративных процедур по поиску идеального маршрута и состава бригады, без комплексного учета всего множества разнородных факторов и критериев эффективности. Кроме того, действующие системы поддержки решений не в должной степени учитывают компетенции работников ОВБ, их текущее функциональное состояние, опыт выполнения аварийно-восстановительных работ (далее – АВР), согласованность действий внутри бригады, а также взаимосвязь этих характеристик с технической готовностью оборудования, транспортной доступностью и условиями развития аварийной ситуации.

В условиях оперативной обстановки диспетчер вынужден в ограниченное время одновременно принимать решения с учетом технического состояния оборудования и транспорта, временных нормативов, погодных условий, прогноза развития аварийной ситуации, логистических характеристик транспортных потоков, а также профессиональных и психофизиологических особенностей работников ОВБ. Значительно осложняет процесс принятия своевременного и правильного решения то обстоятельство, что указанные данные поступают из различных источников, имеют разную степень полноты, актуальности и достоверности, и, как правило, могут быть рассинхронизированы во времени и неоднородны по семантике. В результате еще более возрастает информационная нагрузка на диспетчера, что снижает оперативность принятия решения и повышает риск выбора нерационального состава, оснащения или маршрута следования бригады.

Современные цифровые и конструкторско-технологические методы и решения создают возможности для более детального описания состояния персонала, техники и возможной логистики, а также параметров аварийной ситуации. Однако их использование приводит к увеличению размерности задачи, усложнению структуры исходных данных и росту вычислительных затрат. Поэтому актуальной научной задачей является разработка модели и метода поддержки принятия решений по назначению ОВБ, позволяющих формализовать зависимости между техническими, организационно-логистическими и человеческими факторами, выделить наиболее значимые критерии готовности бригады и обеспечить заданную оперативность принятия обоснованного решения при ликвидации аварий в распределенных электрических сетях.

Степень разработанности темы исследования. Проблема повышения эффективности оперативно-диспетчерского управления (далее – ОДУ) в электроэнергетике существует с момента становления крупных электроэнергетических систем и приобрела особую значимость во второй половине XX века в связи с ростом масштабов централизованного управления, усложнением режимов функционирования электросетей и повышением требований к надежности электроснабжения. В современных условиях ее актуальность усиливается развитием цифровых технологий, создающих новые возможности обработки оперативной информации.

Научно-методический аппарат оптимизации ОДУ в электроэнергетике, обеспечения надежности электроснабжения и восстановления сети после аварий получил развитие в трудах В.А. Веникова, Г.Г. Кукеля, Ю.Н. Руденко, В.И. Сыромятникова, Д.Б. Гвоздева, R. Billinton, R. Allan, P. Kundur. Вопросы развития автоматизированных систем диспетчерского управления и цифровых платформ SCADA, EMS, OMS, ADMS исследованы А.В. Колесниковым, А.В. Ставицким, Н.В. Сашиной, Y. Yang, S. Lei, T. Ding, H.D. Kaushik и др.

В области поддержки принятия решений существенный вклад внесли исследователи методов многокритериального анализа, включая Т. Саати, C.L. Hwang, K. Yoon, B. Roy, J.P. Brans, B. Mareschal, S. Opricovic, применяемые для формализации выбора альтернатив при управлении ресурсами, включая задачи назначения ОВБ. Параллельно развиваются подходы к формированию композитных индексов готовности и устойчивости, опирающиеся на методы многокритериального анализа, агрегирования показателей и объективизации весовых коэффициентов (Greco S., Chen R., Соловьев Д.С. и др.).

Математические модели процессов АВР и задач оптимального распределения и маршрутизации ремонтных бригад разработаны в работах T. Ding, Z. Wang, S. Lei, L. Zhang, H. Kaushik, Q. Shi, Y. Yang, а также А.Р. Кинжалиевой, А.А. Хановой, Д.С. Соловьева. Наиболее актуальные исследования D. Qiu, F. Amani, S. Biswas и др. развивают применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта в электроэнергетике.

Отдельное направление составляют исследования человеческого фактора, мониторинга усталости и функционального состояния персонала. В работах J.E. Naranjo, T. Fonseca, N.R.A. Martins, M. Moshawrab, D. Bustos, L. Dai показано, что носимые датчики и физиологический мониторинг позволяют получать данные, значимые для оценки утомления и снижения работоспособности.

Проанализировав указанные источники, установлено, что в настоящее время недостаточно разработаны модели, позволяющие формализовать устойчивые зависимости между состоянием ОВБ, характеристиками персонала, технической оснащенностью, логистическими условиями и результативностью ее назначения на АВР. В существующих подходах человеческий фактор, включая компетенции сотрудников, опыт выполнения аварийных работ, текущее функциональное состояние и согласованность действий внутри бригады, как правило, рассматривается фрагментарно либо не связывается с параметрами техники и логистики в единой модели принятия решений.

Отсутствие формализованных зависимостей между указанными факторами приводит к тому, что получаемые на основе существующих моделей оценки готовности бригад могут быть неполными или искаженными. В результате возрастает вероятность ошибочного назначения ОВБ, снижается оперативность диспетчерского решения и увеличивается риск нарушения нормативных сроков ликвидации аварий. В связи с этим требуется разработка научно-методического аппарата, учитывающего специфику данных о персонале, технике и логистике в электроэнергетике,

обеспечивающего определение комплексной готовности бригад и сохраняющего интерпретируемость результатов для диспетчера.

Цель и задачи исследования. Цель исследования заключается в обеспечении заданной оперативности принятия оптимального – по критерию максимизации комплексного показателя оценки готовности бригады – решения о составе, оснащении и маршруте движения ОВБ электросетевой компании при проведении АВР в условиях неполноты, рассинхронизации и семантической неоднородности поступающих данных.

Для достижения поставленной цели исследования в работе поставлены следующие **задачи**:

– разработать модель процесса управления ОВБ при проведении АВР с учетом всех необходимых для решения задачи назначения факторов;

– разработать численный метод расчета параметров ОВБ электросетевой компании на основе динамической модели управления ОВБ, обеспечивающий формирование точных и оперативных рекомендаций для принятия решений при оперативном назначении ОВБ;

– разработать практические рекомендации по реализации комплекса программ для внедрения предложенного численного метода оперативного управления параметрами (состав, оснащение и маршрут следования) ОВБ при создании интеллектуальной системы поддержки принятия решений (далее – ИСППР) диспетчера электросетевой компании и действующий прототип комплекса программ, реализующий предложенный численный метод.

Объектом исследования являются процессы управления ОВБ при проведении АВР в распределенных электрических сетях в условиях информационной неопределенности и временных ограничений.

Предметом исследования являются модели, методы и алгоритмы комплексной оценки готовности ОВБ и поддержки принятия решений диспетчера по их назначению.

Область исследования диссертации соответствует п. 8. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента», п. 9. «Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий» Паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Научная новизна исследования. На основании проведенных исследований и экспериментов получены новые научные результаты:

1) Разработана динамическая модель процесса управления ОВБ при проведении АВР, отличающаяся от известных эргатических и онтологических моделей в электроэнергетике в части гомеостаза оператора в условиях информационной нагрузки Гвоздева Д.Б., онтологии предприятия Шведина Б.Я. и цифровых двойников диспетчера и профессионально-важных качеств ремонтной ОВБ Шокина Ю.И. тем, что:

– комплексный показатель оперативной готовности бригады формализован как функция трехмерного вектора состояния, обеспечивающая переход от многомерного

описания к задаче принятия управленческого решения о плане ликвидации аварийных ситуаций в электрических сетях;

– готовность ОВБ формализована в виде динамической эргатической модели, представляемой совокупностью трех взаимосвязанных частных показателей «Человек», «Техника», «Логистика», каждый из которых задается собственным набором признаков, с учетом деструктивных факторов, обусловленных неполнотой, рассинхронизацией и семантической неоднородностью данных учетом, а также динамики информационного обмена между частными моделями;

– при этом изменение состояния каждой подсистемы во времени описывается функциональными зависимостями, формируемыми на основе поступающих данных и отражающими динамику характеристик персонала, технических средств и логистических условий с учетом неполноты и рассинхронизации информации, что позволяет учитывать текущие деструктивные факторы, влияющие на комплексный показатель готовности и получить адекватные зависимости комплексного показателя от неоднородных возмущающих факторов с учетом сопоставимости с нормативами по времени ликвидации аварий.

2) Разработан численный метод расчета параметров (состав, оснащение и маршрут следования) ОВБ электросетевой компании на основе динамической эргатической модели «Человек–Техника–Логистика», отличающийся от известных методик управления выездными бригадами при проведении АВР Гвоздева Д.Б., Кинжалиевой А.Р., Полюховича М.А. тем, что:

– расчет текущих значений оригинального комплексного показателя готовности ОВБ к выполнению АВР осуществляется по текущим оценкам состояния подсистем трехмерной динамической системы управления «Человек», «Техника» и «Логистика»;

– при этом требуемая точность и оперативность обработки неоднородных данных обеспечивается формированием временно и семантически согласованного пространства признаков динамической модели управления по результатам, а также их агрегацией за счет последовательного формирования структуры признаков в виде слоев данных, отражающих актуальность, семантическую определенность и способ получения параметров;

– адаптивная корректировка весовых коэффициентов частных показателей подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика» в составе комплексного показателя оперативной готовности ОВБ, осуществляется по результатам анализа альтернатив, мнений и компетентности экспертов с применением методов машинного обучения, что позволяет обеспечить заданную оперативность принятия оптимального решения за счет принятия решения на основании комплексных параметров (состав, оснащение и маршрут следования) ОВБ и их корректировки.

3) Разработаны практические рекомендации по реализации комплекса программ для внедрения предложенного численного метода оперативного управления параметрами (состав, оснащение и маршрут следования) ОВБ при создании ИСППР диспетчера электросетевой компании и действующий прототип комплекса программ, реализующий предложенный численный метод.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в развитии методологической базы моделирования эргатических систем в электроэнергетике. В отличие от существующих подходов, ориентированных преимущественно на оптимизацию маршрутизации и распределения ресурсов, в работе предложена динамическая модель оперативно-выездной ремонтной бригады как системы «Человек–Техника–Логистика». Разработаны принципы выравнивания разнородных данных (по времени, пространству и семантике) и формирования комплексного показателя готовности бригады с учетом неполноты и рассинхронизации информации. Сформулирован и обоснован научно-методический аппарат интеграции показателей состояния персонала, технических средств и логистической инфраструктуры, ориентированный на некомпенсируемость критических факторов и интерпретируемость для лица, принимающего решения. Полученные результаты могут служить основой для дальнейшей разработки теоретико-игровых и многоагентных моделей взаимодействия ремонтных бригад, сетевой инфраструктуры и внешней среды.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанной модели и метода при проектировании и применении систем поддержки принятия решений в электросетевых компаниях. Предложенная динамическая эргатическая модель позволяет: оценивать комплексную готовность ОВБ к выполнению АВР; обосновывать назначение бригад на конкретные заявки с учетом человеческого фактора, технической укомплектованности и логистических ограничений; сравнивать альтернативные варианты маршрутизации и распределения ресурсов по интегральным показателям готовности и риска. На ее основе возможна реализация численного метода, который позволяет анализировать различные аварийные и кризисные сценарии, влияние изменений в составе бригад, парке техники и логистике на показатели времени восстановления и надежности электроснабжения, а также использовать полученные оценки как инструмент поддержки оперативных и стратегических управленческих решений.

Методология и методы исследования основаны на результатах работ российских и зарубежных авторов в области управления сложными техническими и эргатическими системами, моделирования процессов АВР в электроэнергетике, многокритериального анализа альтернатив, оценки человеческого фактора и построения композитных индексов готовности. В исследовании использовались методы системного анализа, научной абстракции, математического и имитационного моделирования, теории графов и сетевых структур, теории принятия решений и многокритериальной оптимизации, методы машинного обучения для обработки и интеграции разнородных данных, а также объектно-ориентированное программирование при реализации программных прототипов.

Информационную базу исследования составили: эксплуатационные данные электросетевых компаний о заявках и АВР, сведения о составе и характеристиках ОВБ и парка техники, журналы диспетчерских переключений, данные телеметрии и автоматизированных систем учета и контроля, логистическая информация

о транспортной инфраструктуре и временных задержках, а также статистические и аналитические материалы, представленные в научных публикациях, отраслевых отчетах и материалах конференций.

Положения, выносимые на защиту. В соответствии с поставленными задачами, положения, выносимые на защиту, включают в себя следующее:

1) динамическая эргатическая модель процесса управления ОВБ при проведении АВР, отличающаяся от известных моделей тем, что готовность ОВБ формализована в виде комплексной эргатической модели, представляемой совокупностью трех взаимосвязанных частных показателей «Человек», «Техника», «Логистика», каждый из которых задается собственным набором признаков, с учетом деструктивных факторов, обусловленных неполнотой, рассинхронизацией и семантической неоднородностью данных, а также динамики информационного обмена между частными моделями (С. 46-69);

2) численный метод расчета параметров ОВБ (состав, оснащение, маршрут следования) электросетевой компании на основе динамической эргатической модели «Человек–Техника–Логистика», обеспечивающий формирование рекомендаций для принятия решений при оперативном назначении ОВБ, отличающийся от известных методов управления выездными бригадами при АВР тем, что расчет текущих значений оригинального комплексного показателя готовности ОВБ к выполнению АВР осуществляется по текущим оценкам состояния подсистем трехмерной динамической системы управления «Человек», «Техника» и «Логистика», при этом требуемая точность и оперативность обработки разнородных (неоднородных) данных, обеспечивается формированием временно и семантически согласованного пространства признаков динамической модели управления, а адаптивная корректировка весовых коэффициентов частных показателей подсистем, осуществляется по результатам анализа альтернатив, мнений и компетентности экспертов с применением методов машинного обучения (С. 70-113);

3) практические рекомендации по реализации комплекса программ для внедрения предложенного численного метода оперативного управления параметрами (состав, оснащение и маршрут следования) ОВБ при создании ИСППР диспетчера электросетевой компании и действующий прототип комплекса программ, реализующий предложенный численный метод (С. 114-137).

Степень достоверности, апробация и внедрение результатов исследования. Достоверность положений исследования подтверждается их апробацией в установленном порядке, применением качественных и количественных методов оценки рассматриваемых проблем, изучением научных публикаций отечественных и зарубежных авторов по тематике исследования. Основные положения и результаты рассмотрены и одобрены на следующих научных конференциях: на 38-й Всероссийской научной конференции молодых ученых «Реформы в России и проблемы управления – 2023» (Москва, Государственный университет управления, 12-13 апреля 2023 г.); на V Международной научно-практической конференции «Современные тренды управления и цифровая экономика: от регионального развития

к глобальному экономическому росту» (г. Екатеринбург, Институт Цифровой Экономики и Права, 10 августа 2023 г.); на Международном конгрессе «Современные проблемы компьютерных и информационных наук» (Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 21-23 ноября 2024 г.); на XII Всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития РЛС дальнего обнаружения и информационных систем в интересах обеспечения Воздушно-космических сил Российской Федерации» (Москва, Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца, 20 ноября 2025 г.); на XX Международной молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (г. Казань, Казанский государственный энергетический университет, 9-10 декабря 2025 г.); на XV Конгрессе молодых ученых (Санкт-Петербург, ИТМО, 6-10 апреля 2026 г.).

Материалы исследования используются в практической деятельности ООО «Системы виртуальной инерции», в части разработанной автоматизации определения весов критериев в задачах поддержки принятия решений по результатам регрессионного анализа. По материалам исследования внедрен автоматический подбор весов для задания коэффициентов инерции и демпфирования в системе автоматического управления преобразователем. Эффект выразился в снижении на 5-8% величины перерегулирования и снижении на 10% времени переходного процесса по частоте при наборе активной мощности в энергосистеме, что способствует улучшению разрабатываемых систем автоматического управления силовых преобразователей и конкурентоспособности.

Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Показатель для управления ОВБ», подготовленной по результатам исследования (свидетельство о регистрации Роспатента № 2026611854 от 22.01.2026; правообладатель: Комарова Л.А., авторы Комарова Л.А., Захаров А.С., Зюзин Г.М.).

Материалы диссертации используются Кафедрой искусственного интеллекта Факультета информационных технологий и анализа больших данных Финансового университета в преподавании учебной дисциплины «Машинное обучение».

Апробация и внедрение результатов исследования подтверждены соответствующими документами.

Публикации. Основные положения и результаты исследования отражены в 8 публикациях общим объемом 8,47 п.л. (авторский объем – 5,19 п.л.), в том числе 7 работ общим объемом 7,51 п.л. (авторский объем – 4,56 п.л.) опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России, а также 1 работа общим объемом 0,96 п.л. (авторский объем – 0,63 п.л.) опубликована в изданиях, индексируемых в международной цитатно-аналитической базе «Scopus».

Структура и объем диссертации определяются поставленной целью, задачами и логикой исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 139 наименований и трех приложений. Текст диссертации изложен на 176 страницах, включает 7 таблиц, 21 рисунок.

II Основное содержание работы

Во Введении раскрывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна, сформулирована теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ процесса современного состояния ОДУ в электросетевых компаниях. Определено место ОВБ в ликвидации технологических нарушений. Показано, что диспетчер должен выбрать бригаду, ее состав, оснащение и маршрут в пределах ограниченного времени, используя сведения из SCADA, GIS, OMS, кадровых, технических и логистических систем.

Анализ существующих подходов показал, что автоматизированные системы в основном собирают и отображают информацию, модели маршрутизации оптимизируют путь, а методы многокритериального выбора сопоставляют заранее сформированные альтернативы. При этом отсутствует единая метрика, которая связывает характеристики работников, готовность техники и условия движения и одновременно учитывает качество разнородных данных.

По результатам анализа поставлена задача построения модели, которая преобразует разрозненные сведения в три сопоставимых частных показателя, объединяет их в комплексную оперативную готовность, прогнозирует ее изменение до момента прибытия и использует полученное значение как критерий назначения ОВБ.

Такая модель может быть описана алгебраической системой по формуле (1)

$$M = \langle \mathrm{Z}, \mathrm{O}, \mathrm{D}, \mathrm{U}, \Xi, \Phi \rangle, \quad (1)$$

где M – модель управления ОВБ;

Z – множество параметров персонала, техники, логистики, аварийной ситуации и нормативных требований;

O – множество операторов преобразования данных, формирования состояния и расчета показателей;

D – множество возмущающих факторов, влияющих на процесс управления ОВБ;

U – множество допустимых управляющих воздействий;

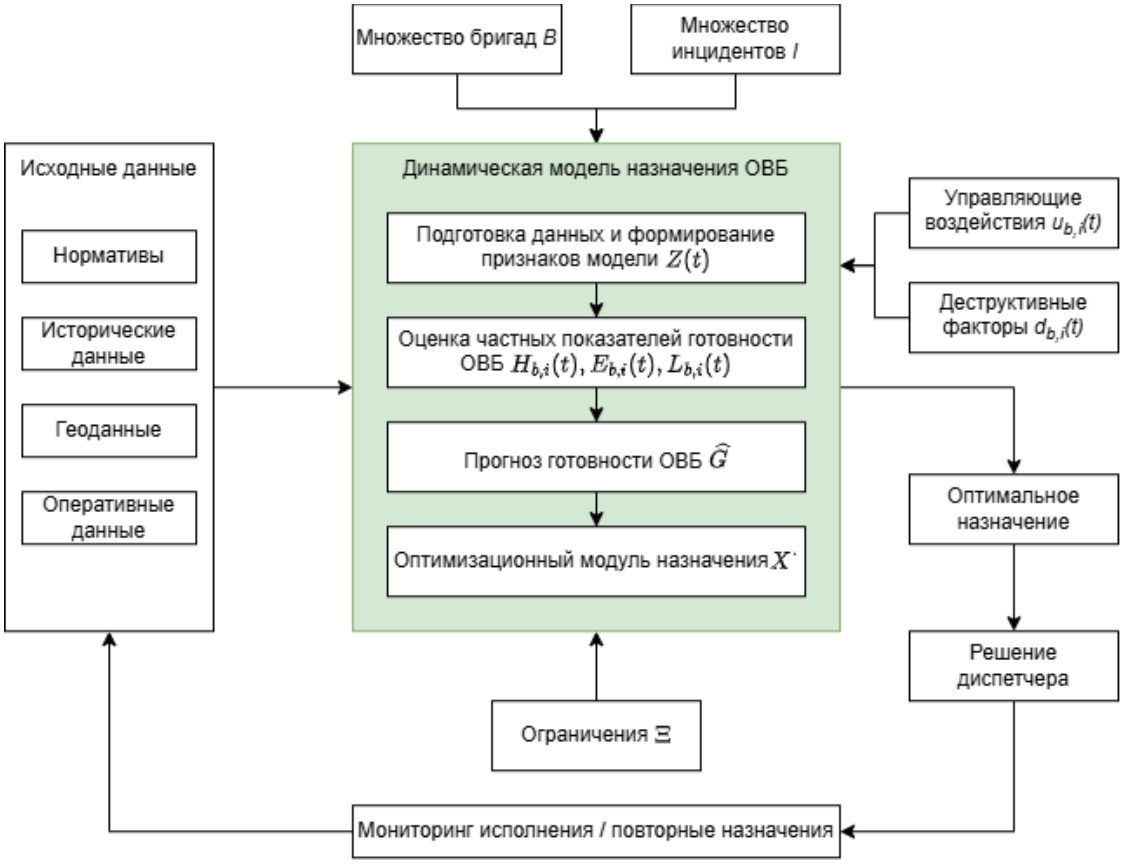
Ξ – множество отношений и ограничений, задающих допустимые конфигурации системы;

Φ – функция агрегации частных показателей подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика».

Во второй главе разработана оригинальная динамическая эргатическая модель управления ОВБ электросетевой компании при проведении АВР. Проведенный анализ показал, что процесс принятия решений по назначению бригады на АВР требует представления состояния ремонтной бригады, как целостного объекта управления и методологически соответствует эргатическим системам управления. На основании этого обоснованы требования к модели как динамической эргатической системе с учетом характеристик аварийной ситуации

и динамически изменяющейся оперативной обстановки и информационной неопределенности. ОВБ рассматривается как система «Человек–Техника–Логистика». Подсистема «Человек» характеризует соответствие работников требованиям аварии и их текущее состояние; подсистема «Техника» – наличие и готовность оборудования и транспорта; подсистема «Логистика» – возможность своевременного прибытия по выбранному маршруту. Выделение логистики в самостоятельную подсистему необходимо, поскольку даже подготовленная и оснащенная бригада не может считаться оперативно готовой, если время ее прибытия не соответствует условиям инцидента.

Общая структура динамической модели управления ОВБ представлена на рисунке 1.



Источник: составлено автором.
Рисунок 1 – Структура динамической модели управления ОВБ

Каждая подсистема динамической эргатической модели управления ОВБ характеризуется частным показателем оперативной готовности $(H_{b,i}(t), E_{b,i}(t), L_{b,i}(t))$, формируемым на основе данных, поступающих из разнородных информационных источников (ERP- и HR-систем, SCADA, систем мониторинга оборудования, геоинформационных сервисов, метеоданных).

Агрегация указанных частных показателей образует вектор состояния бригады, динамика которого отражает изменение возможностей бригады в процессе ликвидации аварии. Состояние ОВБ b при ликвидации аварии i в момент времени t определяется формулой (2)

$$s_{b,i}(\mathrm{t}) = \left(H_{b,i}(t), E_{b,i}(t), L_{b,i}(t)\right)^T \in [0,1]^3, \quad (2)$$

где $H_{b,i}(t)$ – показатель готовности подсистемы «Человек»;
$E_{b,i}(t)$ – показатель готовности подсистемы «Техника»;
$L_{b,i}(t)$ – показатель готовности подсистемы «Логистика».

Частные показатели рассчитываются по собственным наборам признаков. Благодаря этому сохраняется интерпретируемость результата.

Для перехода от многомерного описания состояния ОВБ к формализованной процедуре принятия управленческих решений введен комплексный показатель оперативной готовности бригады $G_{b,i}(t)$, определяемый по формуле (3)

$$G_{b,i}(t) = \begin{cases} H_{b,i}(t)^{\alpha_H} E_{b,i}(t)^{\alpha_E} L_{b,i}(t)^{\alpha_L}, & s_{b,i}(t) \in S_i^{adm} \\ 0, \text{иначе} \end{cases}, \quad (3)$$

где $\alpha_H, \alpha_E, \alpha_L$ – весовые коэффициенты подсистем «Человек», «Техника», «Логистика»;
S_i^{adm} – область допустимых состояний системы.

Для учета динамики системы введена система дифференциальных уравнений (4)

$$F_{b,i}\left(t, s_{b,i}(\mathrm{t}), u_{b,i}(t), d_{b,i}(t)\right) = \begin{cases} \dot{H}_{b,i}(t) = -\lambda_H H_{b,i}(t) + u_{b,i}^H(t) - d_{b,i}^H(t) \\ \dot{E}_{b,i}(t) = -\lambda_E E_{b,i}(t) + u_{b,i}^E(t) - d_{b,i}^E(t) \\ \dot{L}_{b,i}(t) = -\lambda_L L_{b,i}(t) + u_{b,i}^L(t) - d_{b,i}^L(t) \end{cases}, \quad (4)$$

где $F_{b,i}$ – функция динамики состояния системы;
$\lambda_H, \lambda_E, \lambda_L \geq 0$ – коэффициенты естественной деградации соответствующих показателей;
$u_H(t), u_E(t), u_L(t) \geq 0$ – управляющие воздействия, направленные на повышение готовности бригады;
$d_H(t), d_E(t), d_L(t) \geq 0$ – деструктивные воздействия, снижающие готовность бригады.

Комплексный показатель используется как формальный критерий назначения. Однако выбор только по текущему состоянию может быть неверным: до момента прибытия работники могут устать, техника – изменить состояние, а дорожная обстановка – ухудшиться или улучшиться. Поэтому в модели рассчитывается прогноз каждого частного показателя на горизонт времени, соответствующий ожидаемому прибытию бригады к месту аварии.

На основании введенных ДУ и комплексного показателя оперативной готовности бригады формализована задача управления ОВБ. Пусть B – множество ОВБ, допустимых

к назначению для ликвидации аварии i в момент времени t. Прогнозное значение $G_{bi}(t)$ используется при формировании матрицы затрат, после чего задача сводится к классической задаче о назначениях.

Задача распределения нескольких бригад по нескольким инцидентам имеет вид (5)

$$\pi^*(t) = arg \max_{\pi \in \Pi(t)} \sum_{i \in I_t} G_{\pi(i),i}(t), \tag{5}$$

где $\pi^*(t)$ – оптимальное назначение нескольких бригад по инцидентам;

$\Pi(t)$ – множество допустимых вариантов распределения бригад по инцидентам в момент времени;

$G_{\pi(i),i}(t)$ – комплексный показатель готовности бригады, определяется формулой (3).

Таким образом, разработанная динамическая эргатическая модель обеспечивает формализованное представление процесса принятия решений диспетчером и связывает исходные данные с управленческим решением в следующей последовательности: признаки персонала, техники и логистики преобразуются в частные показатели; частные показатели образуют вектор состояния; система дифференциальных уравнений дает прогноз состояния; комплексный показатель переводит прогноз в единую оценку; задача оптимизации определяет назначение с максимальной суммарной готовностью.

В третьей главе разработан численный метод, реализующий эту последовательность вычислений.

Исходные данные поступают из внутренних и внешних источников асинхронно, могут содержать пропуски и иметь текстовую либо категориальную форму с нефиксированной семантикой.

Для расчетов формируется единый временно и семантически согласованный слой признаков, дополненный характеристиками качества данных, посредством реализации четырех вычислительных блоков.

Блок А формирует согласованный во времени слой признаков на момент принятия решения t, исключая поступление данных из будущего относительно аварийного события, а при наличии ретроспективных обновлений данных и осуществляет выбор последней доступной версии записи по каждому ключу по формуле (6)

$$Z_n^{(1)}(t) = \{ z_{n,\mathrm{k}}^{\star}(t) \mid k \in K_n \}, \tag{6}$$

где $Z_n^{(1)}(t)$ – согласованный во времени слой данных;

$z_{n,k}^{*}(\mathrm{t})$ – последняя версия записи по ключу k (лексикографический максимум по времени регистрации события);

K_n – множество ключей таблицы n.

В *Блоке Б* выполняется семантическое выравнивание текстовых данных. Сопоставление значения c с понятием онтологии (Ω) выполняется по максимуму косинусной близости (7)

$$ont_a(c^{text}) = \begin{cases} \omega_a^*(c^{text}),\ \max\limits_{\omega\in\Omega} \frac{e(c^{text})^T e(\omega)}{\|e(c^{text})\|\|e(\omega)\|} \geq \eta \\ NA,\ \max\limits_{\omega\in\Omega} \frac{e(c^{text})^T e(\omega)}{\|e(c^{text})\|\|e(\omega)\|} < \eta \end{cases}, \quad (7)$$

где $ont_a(c^{text})$ – онтологически нормализованное значение атрибута;
ω_a^* – наиболее близкое значение текста в онтологии;
$e(c^{text})$ – векторное представление текста исходного значения;
$e(\omega)$ – векторное представления j-го понятия онтологии;
η – порог качества сопоставления.

Тогда таблица после семантического согласования формируется непосредственно из таблицы актуальных записей по формуле (8)

$$Z_n^{(2)}(t) = \{z[v_{z,a} \leftarrow ont_a(v_{z,a}), a \in Atr_n^{text}] | z \in Z_n^{(1)}(t)\}, \quad (8)$$

где $Z_n^{(2)}(t)$ – таблица после семантического согласования;
$v_{z,a}$ – значение атрибута a в записи z;
$\leftarrow$ – замену исходного текстового значения на соответствующее понятие онтологии;
Atr_n^{text} – текстовые атрибуты;
$Z_n^{(1)}(t)$ – таблица n, содержащая актуальные на момент t записи.

В *блоке С* признаки из всех таблиц объединяются по целевому ключу k согласно формуле (9)

$$Z^{(3)}(t) = LEFTJOIN_k\left(Z_1^{(2)}(t), Z_2^{(2)}(t), \dots, Z_n^{(2)}(t)\right), \quad (9)$$

где $Z^{(3)}(t)$ – единая объединенная таблица;
$\bowtie$ – операция полного внешнего соединения по условиям;
k – ключ объединения.

Блок D заполняет пропуски количественных атрибутов медианами и формирует итоговый слой по формуле (10)

$$Z^{(4)}(t) = \{z\left[v_{z,a}^{(3)} \leftarrow v_{z,a}^{(4)}, a \in Atr_n^{num}\right] | z \in Z_n^{(3)}(t)\}, \quad (10)$$

где $Z^{(4)}(t)$ – таблица после заполнения количественных пропусков;

$v_{z,a}$ – значение атрибута a в записи z;

$\leftarrow$ – замену исходного текстового значения на соответствующее понятие;

$v_{z,a}^{(4)}$ – значение количественного атрибута.

На основании $Z^{(4)}(t)$ будут производиться все дальнейшие расчеты частных показателей.

В составе численного метода разработана методика расчета частных показателей готовности ОВБ по подсистемам «Человек», «Техника» и «Логистика». Показано, что после формирования согласованного признакового слоя задача сводится к последовательному вычислению частных оценок готовности по каждой из подсистем на основании уже унифицированных, нормированных и численно сопоставимых данных.

Частный показатель «Человек» вычисляется в виде агрегированной функции по формуле (11)

$$H_{b,i}(t) = \chi_{b,i}\left(\prod_{j=1}^{5} {C_j^H}^{\beta_j}\right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^{5}\beta_j}}, \tag{11}$$

где C_j^H – нормированная компонента расчета частного показателя «Человек»;

β_j – степень важности вклада каждой компоненты, задается экспертно;

$\chi_{b,i} \in [0,1]$ – множитель кадровых ограничений.

В состав показателя входят компоненты: C_{comp}^H – покрытие компетенций; C_{exp}^H – показатель релевантного опыта; C_{train}^H – актуальность обучения и допусков; C_{team}^H – Сработанность бригады; C_{state}^H – текущее состояние персонала.

Частный показатель «Техника» вычисляется как произведение от нормированных компонент технической готовности по формуле (12)

$$E_{b,i}(t) = \chi_E\left(\prod_{j=1}^{4} {C_j^E}^{\beta_j}\right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^{5}\gamma_j}}, \tag{12}$$

где C_j^E – нормированная компонента расчета частного показателя «Техника»;

γ_j – степень важности вклада каждой компоненты;

$\chi_E \in [0;1]$ – корректирующий множитель технических ограничений.

В состав показателя входят компоненты: готовность транспортных средств, исправность основного оборудования, исправность вспомогательного оборудования, ресурсная обеспеченность.

Частный показатель «Логистика» вычисляется как функция от нормированных логистических компонент по формуле (13)

$$L_{b,i}(t) = \chi_L \left(\prod_{j=1}^{2} C_j^{L\,\delta_j} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^{5} \delta_j}}, \tag{13}$$

где C_j^L – нормированные компоненты логистической готовности;

δ_j – степень важности вклада каждой компоненты;

$\chi_L \in [0; 1]$ – корректирующий множитель логистических ограничений.

В состав показателя входят компоненты: временная достижимость места аварии (ETA), погодные условия.

Для учета важности каждой из подсистем разработана методика определения весовых коэффициентов, используемых при расчете комплексного показателя оперативной готовности бригады. Данная методика обеспечивает учет относительной значимости признаков и частных показателей в составе общей оценки готовности ОВБ.

Каждому критерию сопоставляется многомерное признаковое описание, включающее статистики центральной тенденции, разброса, формы распределения, корреляционные и энтропийные характеристики. После этого задача определения весов сводится к задаче регрессии.

Пусть задано множество альтернатив (14)

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}, \tag{14}$$

которые оцениваются по множеству критериев (15)

$$Cr = \{Cr_1, Cr_2, \dots, Cr_N\}. \tag{15}$$

Экспертные оценки представлены в виде матрицы (16)

$$X^{expert} = \begin{pmatrix} x_{1,1}^{expert} & x_{1,2}^{expert} & \cdots & x_{1,N}^{expert} \\ x_{2,1}^{expert} & x_{2,2}^{expert} & \cdots & x_{2,N}^{expert} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M,1}^{expert} & x_{M,2}^{expert} & \cdots & x_{M,N}^{expert} \end{pmatrix}, \tag{16}$$

где m, n – значение m-й альтернативы по n-му критерию.

Требуется определить вектор весовых коэффициентов по формуле (17)

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T, \tag{17}$$

удовлетворяющих требованиям нормировки, которые задаются условием (18)

$$w_n \geq 0, \sum_{n=1}^{N} w_n = 1. \tag{18}$$

Для каждого критерия Cr_n рассматривается вектор его оценок на основании статистик.

Таким образом, каждому критерию Cr_n сопоставляется вектор признаков по формуле (19)

$$y_n = \begin{pmatrix} \mu_n, \sigma_n, x_n^{min}, x_n^{max}, R_n, CV_n, \widetilde{x_n}, Q_{0.25,n}, Q_{0.75,n}, \\ IQR_n, Skew_n, Kurt_n, \overline{\rho_n}, \rho_n^{max}, Ent_n \end{pmatrix}^T. \tag{19}$$

В методике весовые коэффициенты рассматриваются как линейная функция признаков по формуле (20)

$$w_r^{ref} = y_r^T \theta + \xi_r, \tag{20}$$

где w_r^{ref} – референсное значение веса;

y_r^T – вектор статистических признаков r-го обучающего наблюдения;

θ – вектор параметров модели;

ξ_r – случайная ошибка модели.

Для оценки параметров используется Ridge-регрессия, решение которой определяется задачей оптимизации согласно формуле (21)

$$\hat{\theta} = \arg\min_{\theta} \sum_{r=1}^{R} \left(w_r^{ref} - y_r^T \theta\right)^2 + \lambda_{reg} \sum_{j=1}^{P_z} {\theta_j}^2, \tag{21}$$

где P_z – размерность вектора признаков;

λ_{reg} – параметр регуляризации.

Для текущего набора альтернатив модель формирует прогнозные веса $\widetilde{w}_n$ (которые далее нормируются) по формуле (22)

$$\widetilde{w}_n = y_n^T \hat{\theta}. \tag{22}$$

По результатам оценки частных показателей подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика» и формирования весов критериев приведен алгоритм формирования управленческого решения по выбору параметров ОВБ на основе разработанной динамической эргатической модели.

Алгоритм включает два взаимосвязанных уровня. Первый уровень является динамическим и предназначен для прогноза состояния каждой допустимой пары «бригада-инцидент» на заданном горизонте времени. Второй уровень является дискретным и предназначен для выбора назначения бригад на инциденты по прогнозным значениям комплексного показателя готовности.

Пусть в момент t_0 задано множество доступных ОВБ $B_i^{adm}(t_0)$, множество рассматриваемых инцидентов $I(t_0)$, шаг интегрирования Δt и горизонт прогнозирования τ_i для инцидента $i \in I(t_0)$. Для каждой пары (b, i), где $B_i^{adm}(t_0)$, $i \in I(t_0)$, используется вектор состояния $s_{b,i}(t)$ (2). Динамика состояния пары «бригада–инцидент» описывается системой дифференциальных уравнений общего вида (4).

Для численного решения динамической части метода применяется классический метод Рунге-Кутта четвертого порядка, на временной сетке $t_k = t_0 + \mathrm{k}\Delta t$.

После численного прогноза состояния по уравнению (4) для каждой пары «бригада-инцидент» рассчитывается прогнозное значение $G_{b,i}(t_0 + \tau_i)$ и строится матрица $\hat{G} = \left[\hat{G}_{b,i}\right]_{m \times n}$.

Далее прогнозное значение используется во втором шаге алгоритма при построении оптимизационной постановки задачи назначения.

По результатам проведенного анализа способов решения задачи распределения ОВБ по авариям установлено, что после формирования матрицы комплексных оценок готовности ОВБ задача назначения приобретает постановку задачи о назначениях. В этих условиях применение Венгерского алгоритма является обоснованным, поскольку он обеспечивает получение оптимального распределения бригад по аварийным событиям за полиномиальное время, что позволяет сохранить требуемую оперативность принятия диспетчерского решения.

Введем матрицу бинарных переменных $X = \left[x_{b,i}\right]_{m \times n}$, где $x_{b,i} = 1$, если бригада b назначается на инцидент i, и $x_{b,i} = 0$ в противном случае. Тогда оптимальное назначение определяется максимизацией эффективности (прогнозных значений комплексного показателя оперативной готовности бригад к моментам их прибытия на соответствующие инциденты). Целевая функция описывается формулой (23)

$$J(\hat{G}, X) = \sum_{i \in I(t_0)} \sum_{b \in B_i^{adm}(t_0)} \hat{G}_{b,i} x_{b,i} \to max, \tag{23}$$

где $J(\hat{G}, X)$ – целевая функция оптимизации;

B_i^{adm} – множество бригад, допустимых для инцидента i;

$\hat{G}_{b,i}$ – прогнозная готовность бригады по комплексному показателю.

Поскольку классический венгерский алгоритм решает задачу минимизации, матрица прогнозной готовности преобразуется в матрицу $\Gamma = [\gamma_{b,i}]_{m\times n}$ затрат по формуле (24)

$$\gamma_{b,i} = \begin{cases} 1 - \hat{G}_{b,i}, & b \in B_i^{adm} \\ M_{pen}, & b \notin B_i^{adm} \end{cases}, \tag{24}$$

где $\gamma_{b,i}$ – стоимость назначения бригады b на инцидент i;

B_i^{adm} – множество бригад, допустимых для назначения на инцидент i;

M_{pen} – большое штрафное значение для запрещенных пар.

Для применения классической квадратной схемы матрица Γ дополняется до размера $N \times N$, где $N = \max\{m, n\}$. Полученную квадратную матрицу обозначим $\overline{\Gamma} = [\overline{\gamma}_{b,i}]_{N\times N}$.

После преобразования решается эквивалентная задача минимизации по формуле (25)

$$X^* = \underset{X}{argmin} \sum_{b=1}^{N} \sum_{i=1}^{N} \overline{\gamma}_{b,i} x_{b,i}, \tag{25}$$

при условиях, обозначенных формулой (26)

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N} x_{b,i} = 1, \ b = 1, \dots, N \\ \sum_{b=1}^{N} x_{b,i} = 1, \ i = 1, \dots, N \\ x_{b,i} \in \{0,1\}, b, i = 1, \dots, N \end{cases}. \tag{26}$$

Далее выполняются стандартные шаги венгерского алгоритма и результатом является набор назначений X^*, обеспечивающий минимум суммарных прогнозных затрат и, следовательно, максимум целевого функционала.

В четвертой главе для подтверждения эффективности разработанного численного метода управления ОВБ электросетевой компании при назначении на ликвидацию АВР, был проведен вычислительный эксперимент, состоящий из двух этапов:

1) проверка точности метода определения весовых коэффициентов для учета важности частных показателей метода назначения ОВБ на ликвидацию АВР;

2) проверка эффективности применения разработанного численного метода управления ОВБ при назначении на ликвидацию АВР.

Разработанный численный метод сравнивался с базовым способом – ручным нормативным назначением ОВБ диспетчером. Для оценки метода была построена имитационная среда, моделирующая процесс оперативного назначения ОВБ. Эксперимент включал 20 независимых эпизодов, в каждом из которых моделировалось по 6 аварийных заявок; суммарно было воспроизведено 120 аварийных событий.

Временные интервалы между поступлением заявок задавались случайной величиной с экспоненциальным распределением со средним значением 40 минут и минимальным шагом 5 минут. Состав выборки по категориям сложности включал 44 аварии, 42 инцидента I категории и 34 инцидента II категории. Всего проведено 500 имитационных запусков процесса.

Для оценки эффективности использовались показатели среднего времени устранения аварии, выполнения SLA по времени прибытия, выполнения SLA по времени устранения, а также показатель SAIDI (System Average Interruption Duration Index), характеризующий среднюю продолжительность перерывов электроснабжения у потребителей. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ результатов моделирования

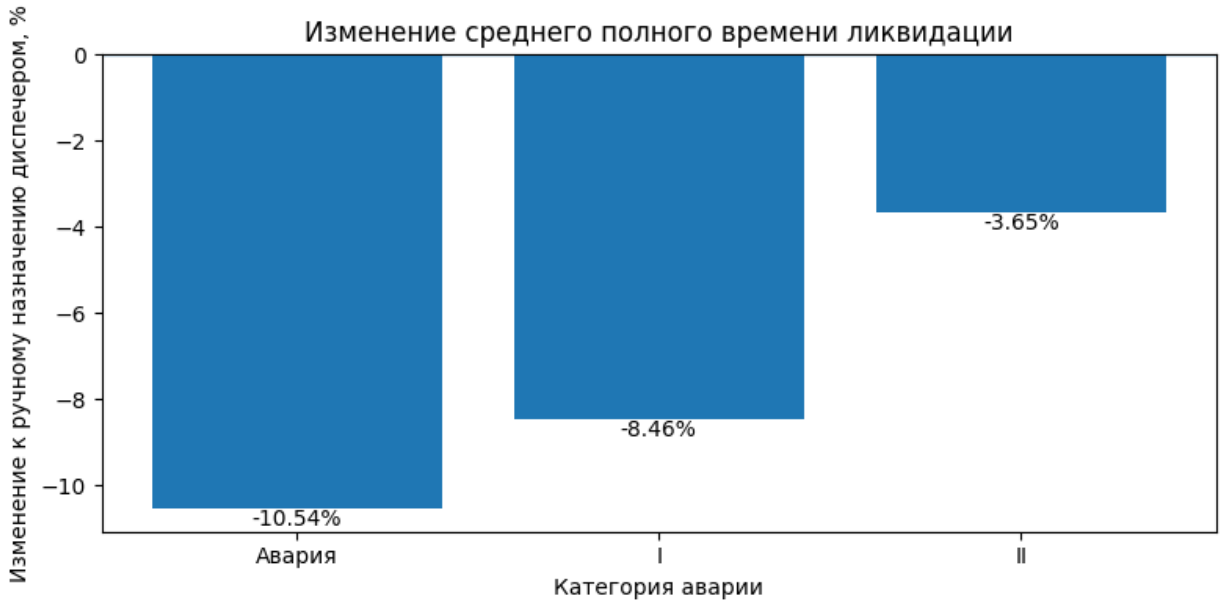
Метрика	Ручное назначение	Численный метод	Δ (процент)
Среднее время устранения аварии (мин)	189,46	172,35	- 9,03
Выполнение SLA по доезду	0,86	1,00	16,28
Выполнение SLA по устранению	0,75	0,86	14,67
SAIDI, мин./потребитель	2759,77	2614,88	- 5,25

Источник: составлено автором.

Результаты моделирования показали, что при использовании разработанного численного метода среднее время устранения аварии сократилось с 189,46 до 172,35 мин, что соответствует снижению на 9,03%. Доля заявок, по которым выполнен SLA по доезду, увеличилась с 0,86 до 1,00, то есть на 16,28%. Доля выполнения SLA по устранению аварии возросла с 0,75 до 0,86, что соответствует улучшению на 14,67%. Значение показателя SAIDI снизилось с 2759,77 до 2614,88 мин/потребитель, то есть снизилось на 5,25%. Полученные результаты свидетельствуют, что при одинаковом стохастическом потоке аварийных событий предложенный численный метод сокращает продолжительность АВР и совокупную длительность перерывов электроснабжения, создавая условия для поддержания заданной оперативности принятия обоснованного диспетчерского решения.

Дополнительно установлено, что наибольший эффект от применения численного метода достигается при ликвидации наиболее сложных аварийных ситуаций. Снижение среднего времени устранения аварий данной категории составило 10,54%, что подтверждает способность метода учитывать совокупность факторов, влияющих на оперативную готовность бригады, включая состав персонала, техническое оснащение, логистические параметры и условия выполнения работ. Проверка устойчивости полученных результатов с использованием бутстрап-выборок подтвердила сохранение направления эффекта, а статистическая проверка различий показала значимость выявленных улучшений.

Изменение среднего времени устранения аварии в зависимости от категории аварии при использовании предложенного численного метода представлено на рисунке 2. На рисунке видно, что снижение среднего полного времени устранения аварии приходится на аварии. Данный факт свидетельствует о том, что численный метод эффективен при назначении на наиболее сложные аварийные ситуации.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2 – Изменение среднего времени ликвидации аварии в зависимости от категории аварии

Таким образом, результаты первого этапа вычислительного эксперимента подтверждают эффективность назначения ОВБ на основе комплексного учета состояния персонала, технической оснащенности, логистических условий и параметров аварийной ситуации. Применение метода сокращает среднее время устранения аварий, повышает долю выполнения нормативов SLA по доезду и устранению и снижает показатель SAIDI. Тем самым метод обеспечивает поддержание заданной оперативности и обоснованности диспетчерского решения при изменяющемся потоке аварийных событий, включая аварии различной категории сложности.

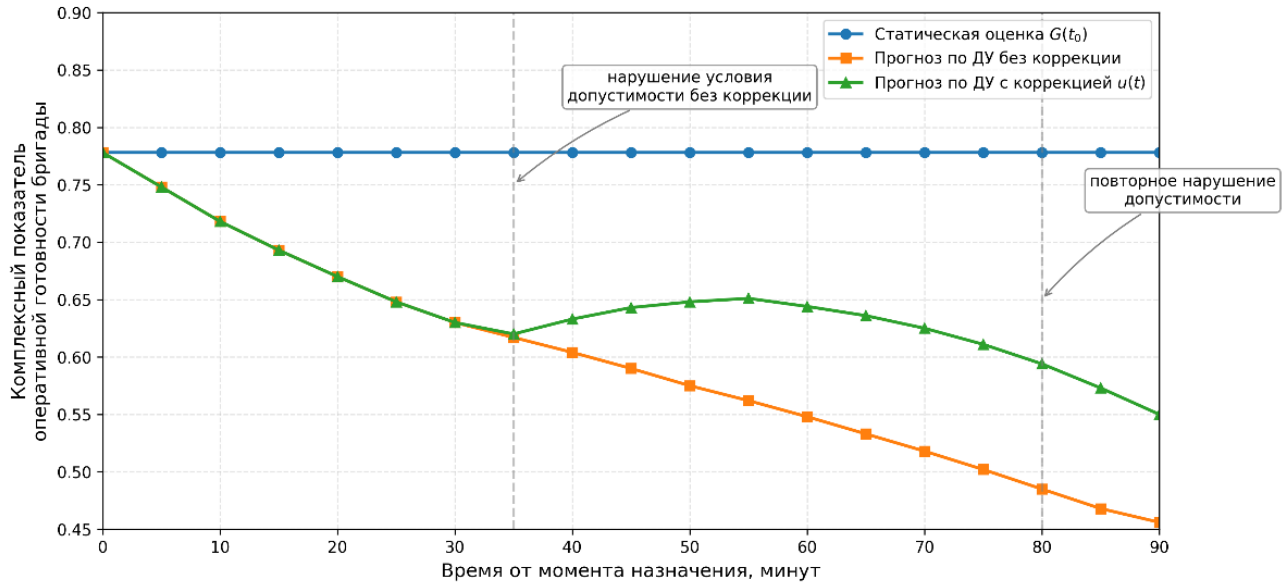
Для того чтобы показать, что полученное улучшение связано с учетом изменения состояния системы во времени дополнительно проведен вычислительный эксперимент.

В эксперименте для каждой пары «бригада–авария» состояние рассматривается как вектор частных показателей (2), на дискретной временной сетке расчет траектории выполняется методом Рунге-Кутта.

Результат моделирования динамики комплексного показателя для одной пары «ОВБ–авария» приведен на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3, статичная оценка, рассчитанная только в начальный момент времени, остается постоянной и не отражает последующее ухудшение состояния. При прогнозировании по дифференциальной модели без корректировки комплексный показатель опускается ниже порога допустимости. Учет

управляющего воздействия позволяет частично вернуть траекторию в область допустимых состояний.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3 – Сравнение статичной оценки и динамического прогноза комплексного показателя оперативной готовности

Тем самым динамическая модель используется в том числе для выявления момента, когда требуется корректировка состава, оснащения или маршрута.

Эффективность разработанного численного метода в значительной степени определяется корректностью расчета весовых коэффициентов, используемых при формировании комплексного показателя оперативной готовности ОВБ. Именно весовые коэффициенты задают относительную значимость частных показателей и критериев, влияющих на итоговое ранжирование альтернатив «бригада – аварийное событие». В связи с этим в диссертации проведен отдельный вычислительный эксперимент, направленный на оценку качества автоматизированного определения весовых коэффициентов.

Для проведения эксперимента использован модуль расчета весовых коэффициентов частных показателей готовности ОВБ.

Сформировано 25 задач по 4 альтернативы, и сформированы профили экспертов, отражающие различия в уровне компетентности, профессиональном опыте и характере предпочтений при оценке критериев. В качестве оценки качества определения весовых коэффициентов использованы метрики MAE, MAPE.

Результаты эксперимента представлены в таблице 2. Анализ результатов эксперимента показывает, что применение современных методов машинного обучения (Ridge) при назначении весовых коэффициентов обеспечивает наилучшую точность восстановления весов критериев.

По сравнению с методом усреднения оценок значение MSE снижается с 0,013 до 0,004, то есть на 69,2%, а по сравнению с комбинированным подходом с 0,009 до 0,004, то есть на 55,6%.

Таблица 2 – Метрики определения весов с помощью ML-моделей

Метод определения весов	MSE	MAE	MAPE
ML (Ridge)	0,004	0,056	103,64
Усреднение	0,013	0,089	259,52
Комбинированный	0,009	0,076	211,85

Источник: составлено автором.

Аналогично, значение MAE уменьшается с 0,089 до 0,056, или на 37,1%, по сравнению с усреднением и с 0,076 до 0,056, или на 26,3%, по сравнению с комбинированным подходом.

Кроме того, установлено, что способ задания весовых коэффициентов существенно влияет на качество ранжирования альтернатив «ОВБ-авария». При использовании весов, рассчитанных ML-моделью, доля совпадений с фактическими решениями диспетчера составила 87%, что значительно выше результатов, полученных при использовании альтернативных способов задания весов. Следовательно, автоматизированное определение весовых коэффициентов является значимым фактором повышения качества численного метода управления ОВБ.

Для оценки вычислительной оперативности предложенного численного метода, проведена серия измерений времени выполнения алгоритмов при различном размере задачи назначения. Эксперименты выполнялись для наборов размерности 3, 5, 8, 12, 16 и 20 заявок с повторными запусками каждого метода (500 итераций).

При сопоставлении с ручным диспетчерским назначением в качестве базового использовались нормативные показатели диспетчеризации в системах оперативного реагирования, которые составляют ~2 мин.

Полученные результаты, представленные в таблице 3, показывают, что при рассмотренных размерностях задачи назначения автоматизированный расчет распределения ОВБ по аварийным событиям выполняется за миллисекунды, что существенно меньше времени, необходимого для принятия человеко-машинного диспетчерского решения.

Таблица 3 – Сравнение вычислительной оперативности методов назначения ОВБ

Подход	Показатель	Значение, с
Нормативное назначение диспетчером	Средний показатель по статистике	~ 60 – 120
Назначение диспетчером с использованием автоматизированной системы диспетчерского управления	Средний показатель по статистике	~ 121
Численный метод	Среднее время вычисления	0,01115 ± 0,00168

Источник: составлено автором.

Следовательно, эксперимент подтверждает, что время вычисления разработанного метода соответствует требованиям ОДУ и позволяет применять его в составе ИСППР диспетчера электросетевой компании.

При этом время автоматизированного расчета назначения ОВБ не является единственным критерием качества решения. Обоснованность рекомендации обеспечивается предварительным расчетом комплексного показателя оперативной готовности, учитывающего кадровые, технические, логистические, нормативные и информационные факторы.

В условиях высокой информационной нагрузки диспетчер не всегда может вручную сопоставить влияние всех критериев, актуальность, полноту и семантическую определенность исходных данных. Поэтому предложенный метод формирует оперативную, воспроизводимую и интерпретируемую рекомендацию по назначению ОВБ и тем самым обеспечивает поддержание заданной оперативности принятия обоснованного решения в составе ИСППР диспетчера.

Для практической реализации численного метода сформированы рекомендации по созданию ИСППР диспетчера электросетевой компании. Разработан действующий прототип комплекса программ ИСППР, включающий модули формирования согласованного пространства признаков, расчета частных и комплексного показателей оперативной готовности, численного прогнозирования состояния ОВБ и оптимального назначения бригад на инциденты.

Прототип реализован в виде горизонтально масштабируемого отказоустойчивого сервиса, предназначенного для развертывания в составе ИСППР диспетчера и формирования рекомендаций по назначению ОВБ в режиме, близком к реальному времени. Практические рекомендации определяют состав вычислительных модулей, последовательность их взаимодействия и требования к включению прототипа в программную архитектуру ИСППР.

III Заключение

Итогом диссертационной работы является решение научной задачи разработки модели и численного метода управления ОВБ электросетевой компании при проведении АВР в условиях неполноты, рассинхронизации и семантической неоднородности поступающих данных.

Разработана динамическая эргатическая модель управления ОВБ, как системы «Человек–Техника–Логистика». Модель учитывает внешние управляющие и деструктивные воздействия и формирует комплексный показатель оперативной готовности по кадровым, техническим, логистическим и информационным характеристикам.

Разработан численный метод расчета параметров ОВБ, обеспечивающий выбор состава, оснащения и маршрута следования бригады по критерию максимизации комплексного показателя оперативной готовности бригады. Метод включает формирование согласованного пространства признаков, расчет частных показателей готовности, автоматизированное определение весовых коэффициентов и решение задачи

назначения ОВБ на аварийные события, прогноз состояния ОВБ. Метод обеспечивает выбор состава, оснащения и маршрута по критерию максимизации суммарной прогнозной готовности при соблюдении ограничений.

Эффективность численного метода подтверждена вычислительным экспериментом: среднее время устранения аварии сократилось на 9,03%, выполнение SLA по доезду увеличилось на 16,28%, выполнение SLA по устранению на 14,67%, показатель SAIDI снизился на 5,25%. Для наиболее сложных аварий снижение среднего времени устранения составило 10,54%. Стандартное среднее время формирования рекомендации составляло 120 с, а достигнутое среднее время расчета 0,01115 ± 0,0168 с (11,15 ± 1,68 мс), что существенно меньше стандартного времени назначения диспетчером. Совокупность результатов подтверждает поддержание заданной оперативности принятия решения в условиях стохастического поступления данных и аварийных событий.

Разработаны практические рекомендации по реализации комплекса программ для внедрения предложенного численного метода оперативного управления параметрами ОВБ при создании ИСППР диспетчера электросетевой компании и действующий прототип комплекса программ, реализующий предложенный численный метод.

Поставленная цель диссертационного исследования достигнута, задачи исследования решены.

IV Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России:

1. Комарова, Л.А. Сравнение языковых моделей в задаче извлечения навыков из вакансий и резюме / Л.А. Комарова, В.И. Соловьев, А.М. Колосов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2024. – № 1. Том 20. – С. 157-163. – ISSN 2411-1473.

2. Комарова, Л.А. Сопоставление векторных представлений вакансий и резюме с использованием больших языковых моделей / Л.А. Комарова, В.И. Соловьев, А.М. Колосов // International Journal of Open Information Technologies / Международный журнал открытых информационных технологий. – 2025. – № 2. Том 13. – С. 56-66. – ISSN 2307-8162. – Текст : электронный. – DOI отсутствует – URL: http://injoit.ru/index.php/j1/article/download/2066/1844 (дата обращения: 22.05.2026)

3. Комарова, Л.А. Ансамбль моделей для автоматической классификации текстов резюме / Л.А. Комарова // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2025. – № 4 (30). – С. 52-57. – ISSN 2658-3488.

4. Комарова, Л.А. Градиентный метод количественной оценки стоимости профессиональных навыков / Л.А. Комарова // System Analysis & Mathematical Modeling (Системный анализ и математическое моделирование). – 2026. – № 1. Том 8. – С. 21–33. – ISSN 2713-1734.

5. Комарова, Л.А. Оценка готовности оперативно-выездных бригад к ликвидации аварии в энергосетевых компаниях / Л.А. Комарова, В.А. Судаков, А.В. Тимошенко

[и др.] // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2026. – № 1. Том 76. – С. 3-14. – ISSN 2079-0279.

6. Комарова, Л.А. Автоматизация определения весов критериев в задачах поддержки принятия решений по результатам регрессионного анализа / Л.А. Комарова, В.А. Судаков, С.Ф. Боев [и др.] // Информация и космос. – 2026. – № 1. – С. 171-181. – ISSN 2072-9804.

7. Комарова, Л.А. Обзор методов интеллектуального формирования ремонтных бригад в электроэнергетике / Л.А. Комарова, А.В. Тимошенко // Наука и бизнес: пути развития. – 2026. – № 2. Том 176. – С. 57-63. – ISSN 2221-5182.

Публикации в международной цитатно-аналитической базе Scopus:

8. Комарова, Л.А. Composite Index for Managing Emergency Repair in Electrical Utilities under Heterogeneous Incident Data = Сводный индекс для управления аварийно-восстановительными работами в электроэнергетических компаниях при разнородных данных об инцидентах / Л.А. Комарова, А.В. Тимошенко, А.А. Кочкаров // Energy Systems Research. – 2026. – №. 1 (33). Volume 9. – P. 28-37. – ISSN 2227-8486. – Текст : электронный. – DOI 10.25729/esr.2026.01.0003. – URL : https://esrj.ru/index.php/esr/article/view/2026-01-0003 (дата обращения : 22.05.2026).

Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ:

9. Комарова, Л.А. Показатель для управления ОВБ / Л.А. Комарова, А.С. Захаров, Г.М. Зюзин // Программы для ЭВМ. Свидетельство о регистрации Роспатента № 2026611854 (22.01.2026).