

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

Тимошенко Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор

Москва – 2026

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Анализ современного состояния и направлений развития оперативно-диспетчерского управления в электросетевых компаниях	15
1.1 Оперативно-диспетчерское управление в электросетевых компаниях	15
1.2 Методы управления оперативно-выездными бригадами при назначении на аварийно-восстановительные работы	22
1.3 Математические модели управления оперативно-выездными бригадами	28
1.4 Постановка цели и задач исследования	39
Глава 2 Динамическая модель управления оперативно-выездными бригадами при проведении аварийно-восстановительных работ	46
2.1 Обоснование требований к динамической модели управления оперативно-выездными бригадами	46
2.2 Пространство состояний и условия применимости динамической модели управления оперативно-выездными бригадами	51
2.3 Формализация комплексного показателя оперативной готовности бригады b для инцидента i в момент времени t	58
2.4 Обоснование структуры модели	66
Глава 3 Численный метод решения задачи управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании на основе комплексного показателя оперативной готовности	70
3.1 Состав численного метода управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании	71
3.2 Формирование пространства признаков динамической модели управления оперативно-выездными бригадами	74
3.3 Расчёт частных показателей готовности оперативно-выездных бригад	84
3.4 Метод расчёта весовых коэффициентов для учета важности подсистем	95

3.5 Алгоритм формирования управленческого решения по параметрам оперативно-выездной бригады на основе динамической модели	102
Глава 4 Оценка эффективности численного метода решения задачи управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании	114
4.1 Описание вычислительного эксперимента по проверке эффективности численного метода расчёта параметров оперативно-выездных бригад электросетевой компании на основе динамической эргатической модели управления оперативно-выездными бригадами при назначении на ликвидацию аварии	115
4.2 Вычислительный эксперимент по оценке определения весовых коэффициентов частных показателей в рамках численного метода	119
4.3 Оценка эффективности численного метода решения задачи оперативного управления параметрами оперативно-выездных бригад	127
4.4 Практические рекомендации по созданию комплекса программ оперативного управления оперативно-выездными бригадами при назначении на ликвидацию аварии	133
Заключение.....	138
Список сокращений и условных обозначений	140
Список литературы.....	141
Приложение А Пример расчета динамики системы на Python	164
Приложение Б Пример исходных данных	168
Приложение В Пример формирования экспертных матриц на Python	169

Введение

Актуальность темы исследования. Практика эксплуатации распределительных 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 учёта всего множества разнородных факторов и критериев эффективности. Кроме того, действующие системы поддержки принятия решений не в должной степени учитывают компетенции членов ОВБ, их текущее функциональное состояние, опыт выполнения аварийно-восстановительных работ, 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 оперативно-выездных бригад. 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 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 оперативно-выездных бригад, 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 распределительных электрических сетях.

Степень разработанности темы исследования. Проблема повышения эффективности оперативно-диспетчерского управления 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 оперативно-диспетчерского управления 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 оперативно-выездных бригад. 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., Соловьёв Д.С., и др.).

Математические модели процессов аварийно-восстановительных работ и задач оптимального распределения ресурсов и маршрутизации ОБВ 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. Соловьёва. Наиболее актуальные исследования Qiu D., Si R., Amani F., Biswas S. 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 Naranjo J.E., Fonseca T., 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 ОБВ, характеристиками персонала, технической оснащённостью, логистическими условиями и результативностью её назначения на аварийно-восстановительные работы. В существующих подходах человеческий фактор, включая компетенции сотрудников, опыт выполнения АВР, 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 искажёнными. В результате возрастает вероятность ошибочного назначения оперативно-выездной бригады, 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 настоящего исследования заключается в обеспечении заданной оперативности принятия оптимального – по критерию максимизации комплексного показателя оценки готовности бригады – решения о составе, оснащении и маршруте движения оперативно-выездной бригады электросетевой компании при проведении аварийно-восстановительных (далее – АВР) работ в условиях неполноты, рассинхронизации и семантической неоднородности поступающих данных.

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

1) разработать модель процесса управления ОВБ при проведении аварийно-восстановительных работ с учетом всех необходимых для решения задачи назначения факторов;

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

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

Объектом исследования являются процессы управления оперативно-выездными бригадами при проведении аварийно-восстановительных работ в распределительных электрических сетях в условиях информационной неопределённости и временных ограничений.

Предметом исследования являются модели, методы и алгоритмы комплексной оценки готовности оперативно-выездных бригад 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 оперативно-выездными бригадами при проведении аварийно-восстановительных работ, отличающаяся от известных эргатических и онтологических моделей в электроэнергетике в части гомеостаза оператора в условиях информационной нагрузки Гвоздева Д.Б. [25], онтологии предприятия Шведина Б.Я. [33] и цифровых двойников диспетчера и профессионально-важных качеств ремонтной бригады Шокина Ю.И. [71] тем, что:

- комплексный показатель оперативной готовности бригады формализован как функция трёхмерного вектора состояния, обеспечивающая переход от многомерного описания к задаче принятия управленческого решения о плане ликвидации аварийных ситуаций в электрических сетях;

- готовность оперативно-выездной бригады формализована в виде динамической эргатической модели, представляемой совокупностью трёх взаимосвязанных частных показателей «Человек», «Техника», «Логистика», каждый из которых задаётся собственным набором признаков, с учётом деструктивных факторов, обусловленных неполнотой, рассинхронизацией и семантической неоднородностью данных учётом, 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) оперативно-выездных бригад электросетевой компании на основе динамической эргатической модели «Человек–Техника–Логистика», отличающийся от известных методик управления выездными бригадами при проведении аварийно-восстановительных работ Гвоздева Д.Б. [25], Кинжалиевой А.Р. [46], Полюховича М.А. [26] тем, что:

- расчет текущих значений оригинального комплексного показателя готовности оперативно-выездной бригады к выполнению аварийно-восстановительных работ 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 счёт последовательного формирования структуры признаков в виде слоев данных, отражающих актуальность, семантическую определённую 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) оперативно-выездных бригад и их корректировке.

3) Разработаны практические рекомендации по реализации комплекса программ для внедрения предложенного численного метода оперативного управления параметрами (состав, оснащение и маршрут следования) оперативно-выездных бригад 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 учётом 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 оперативно-выездных бригад к выполнению аварийно-восстановительных работ; обосновывать назначение бригад на конкретные заявки с учётом человеческого фактора, технической укомплектованности и логистических ограничений;

сравнивать альтернативные варианты маршрутизации и распределения ресурсов по интегральным показателям готовности и риска. На её 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 надёжности 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 аварийно-восстановительных работ 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 аварийно-восстановительных работах, сведения о составе и характеристиках оперативно-выездных бригад и парка техники, журналы диспетчерских переключений, данные телеметрии и автоматизированных систем учёта и контроля, логистическая информация о транспортной инфраструктуре и временных задержках, а также статистические и аналитические материалы, представленные в научных публикациях, отраслевых отчётах 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 оперативно-выездными бригадами при проведении аварийно-восстановительных работ, отличающаяся от известных моделей тем, что готовность

оперативно-выездной бригады формализована в виде комплексной эргатической модели, представляемой совокупностью трёх взаимосвязанных частных показателей «Человек», «Техника», «Логистика», каждая из которых задаётся собственным набором признаков, с учётом деструктивных факторов, обусловленных неполнотой, рассинхронизацией и семантической неоднородностью данных, а также динамики информационного обмена между частными моделями (С. 46-69);

2) численный метод расчёта параметров оперативно-выездных бригад (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 аварийно-восстановительных работах тем, что расчет текущих значений оригинального комплексного показателя готовности оперативно-выездной бригады к выполнению аварийно-восстановительных работ 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) оперативно-выездных бригад 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 XX Международной молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике» (г. Казань, Казанский государственный энергетический университет, 9-10 декабря 2025 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 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 регрессивного 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.

Получено свидетельство о регистрации программа для ЭВМ «Показатель для управления ОВБ», подготовленная по результатам исследования, внесено в Реестр программ для ЭВМ Роспатента (свидетельство о регистрации Роспатента № 2026611854 от 11.01.2026; правообладатель: Комарова Л.А., авторы Комарова Л.А., Захаров А.С., Зюзин Г.М.).

Результаты исследования 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 определяется поставленной целью, задачами и логикой исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 139 наименований и 3 приложений. Текст диссертации изложен на 176 страницах, включает 7 таблиц, 21 рисунок.

Глава 1

Анализ современного состояния и направлений развития оперативно-диспетчерского управления в электросетевых компаниях

1.1 Оперативно-диспетчерское управление в электросетевых компаниях

Система оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике представляет собой комплекс централизованных мер по планированию, координации и управлению технологическими режимами функционирования объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок потребителей. Данные меры реализуются в пределах Единой энергетической системы Российской Федерации, а также технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем субъектами, уполномоченными на осуществление оперативно-диспетчерских функций в установленном законодательством порядке [31]. Кроме того, ОДУ осуществляет оперативное управление режимами функционирования и эксплуатационным состоянием объектов электросетей, обеспечивая их технологическую согласованность и устойчивость функционирования.

Основной задачей функционирования системы оперативно-диспетчерского управления является обеспечение надёжного и устойчивого функционирования электросетевой системы за счет реализации комплекса организационно-технических мероприятий, направленных на поддержание безопасных режимов работы объектов электроэнергетики и предупреждение возникновения аварийных ситуаций.

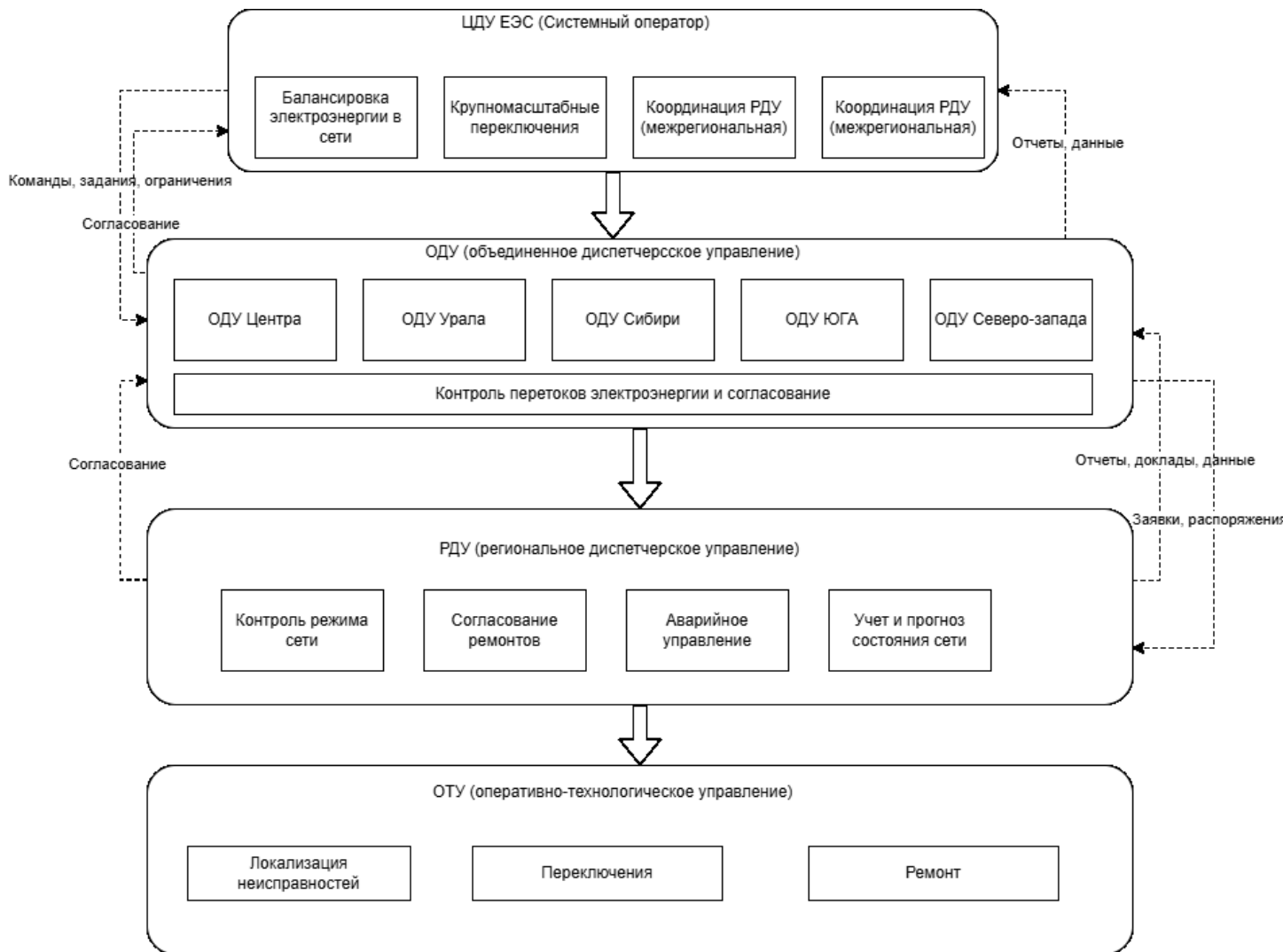
Существующая система управления электрическими сетями решает задачи обеспечения надёжности, непрерывности производства и распределения электроэнергии. Иерархическая система оперативного диспетчерского управления ЕЭС России имеет четыре уровня [28]:

- центральное диспетчерское управление Единой энергосистемой, входящее в структуру исполнительного аппарата Системного оператора;
- объединенные диспетчерские управления энергообъединениями;
- региональные диспетчерские управления энергосистемами одного или нескольких субъектов Российской Федерации;
- оперативно-технологическое управление.

Непосредственное исполнение управленческих решений, формируемых на диспетчерских уровнях, осуществляется субъектами электроэнергетики, реализующими функции оперативно-технологического управления в пределах установленной зоны ответственности. Данные организации обеспечивают выполнение диспетчерских команд, а также практическую реализацию мероприятий по локализации технологических нарушений и восстановлению электроснабжения. Основную роль в этом процессе играют оперативно-выездные бригады, выполняющие диагностику повреждений, проведение аварийно-восстановительных работ и восстановление электроснабжения потребителей. Взаимодействие указанных уровней и участников представлено на рисунке 1.

Развитие институтов управления, в том числе перераспределение задач между системным оператором и сетевыми организациями, а также внедрение концепции центров управления сетями повысили значение нижнего уровня управления (субъектов): контроля за рабочим состоянием элементов электросети и координации работ по устранению повреждений. На данном уровне сосредоточены задачи оперативного контроля состояния элементов электросетевой инфраструктуры, выявления технологических нарушений и организации работ по их устранению.

В соответствии с положениями Федерального закона «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35-ФЗ субъекты электроэнергетики обязаны обеспечивать надёжное и безопасное функционирование объектов электросетевого хозяйства и принимать меры по своевременной ликвидации технологических нарушений.



Источник: составлено автором.

Рисунок 1 – Схема оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике

Следовательно, результат решений диспетчера оценивается по фактической оперативности и надёжности ликвидации аварии. В аварийных условиях именно взаимодействие диспетчера и бригады (время передачи команды, длительность реагирования, полнота и точность информации) становятся определяющими факторами соблюдения установленных законом требований.

В этих условиях возрастает значение оперативности и обоснованности принимаемых диспетчером решений, связанных с направлением оперативно-выездных бригад к месту повреждения, определением их состава, оснащения и маршрута следования.

При этом процесс назначения бригады в существующей практике [26] во многом опирается на нормативы и профессиональный опыт диспетчера, тогда как формализованные методы комплексной оценки альтернатив

(несколько доступных бригад, различная готовность техники, различные маршруты и дорожная обстановка) и прогнозы о возможном возникновении аварии применяются ограниченно. В большинстве случаев выбор осуществляется на основе оперативной оценки диспетчером текущей ситуации и имеющейся у него информации о состоянии сети и доступности ресурсов.

Кроме того, в настоящее время существенно увеличилась функциональная и информационная нагрузка на диспетчерский персонал центров управления сетями (далее – ЦУС), что обусловлено необходимостью оперативной обработки значительных объёмов разнородной информации. Как отмечается в исследованиях по эксплуатации распределительных электрических сетей и интеллектуальных энергосистем [25; 40], рост объёма телеметрических данных и интеграция различных информационных платформ существенно усложняют процессы диспетчерского управления и принятия решений. Диспетчер должен в ограниченное время осуществлять анализ поступающих данных, оценивать возможные варианты реагирования и принимать решение о направлении конкретной бригады к месту технологического нарушения.

По данным исследований [24; 28; 130], значительная доля времени ликвидации технологических нарушений приходится именно на этап выявления повреждения, принятия решения о направлении бригады и организации её прибытия к месту аварии. При этом решения о направлении оперативно-выездной бригады должны приниматься в пределах ограниченного регламентного времени, поскольку задержка на этапе выбора бригады и планирования её маршрута непосредственно увеличивает общее время ликвидации технологического нарушения. Следовательно, система поддержки принятия решений должна обеспечивать не только обоснованность выбора альтернатив, но и заданную оперативность формирования управленческого решения.

В текущей практике для решения таких задач используются автоматизированные системы диспетчерского управления (далее – АСДУ), которые представляют собой класс информационных систем, предназначенных для помощи лицам, принимающим решения, в условиях

неопределенности, многокритериальности и большого объема данных [30]. Они сочетают в себе методы анализа данных, моделирования и визуализации информации.

Стоит отметить, что усложнение структуры информационного обеспечения электроэнергетики, сопровождающееся ростом объема телеметрических данных и увеличением числа распределённых источников информации (SCADA, GIS, OMS, метеоданные, системы кадрового учёта), существенно повышает требования к возможностям таких систем. Информация из указанных источников характеризуется различной структурой, форматом представления и частотой обновления. В результате диспетчер сталкивается с ситуацией неполноты, временной рассинхронизации и семантической неоднородности поступающих данных, что дополнительно усложняет их интерпретацию и повышает вероятность принятия неоптимальных решений. В условиях необходимости принятия управленческих решений в пределах регламентных нормативов времени восстановления электроснабжения существующие автоматические системы диспетчерского управления сталкиваются с рядом ограничений:

- фрагментированность архитектуры информационных систем управления электросетевой инфраструктурой и недостаточная семантическая интеграция данных между SCADA, GIS, OMS и корпоративными системами сетевых компаний;
- низкая адаптивность существующих алгоритмов обработки данных к асинхронному поступлению информации из различных источников;
- ограниченный учёт факторов, влияющих на эффективность реагирования при назначении оперативно-выездной бригады, включая её фактическую готовность, наличие необходимого оборудования, квалификацию персонала, удалённость объекта повреждения, транспортную доступность и текущую дорожную обстановку;
- высокая роль диспетчерского опыта при выборе альтернатив по бригадам.

Указанные ограничения существенно снижают эффективность использования АСДУ в задачах оперативного управления аварийно-восстановительными работами и усложняют процесс принятия управленческих решений диспетчерским персоналом. В условиях роста объёма и неоднородности поступающей информации возникает необходимость поиска путей совершенствования существующих средств информационной поддержки диспетчерского управления, направленных на повышение обоснованности и оперативности выбора управленческих решений.

Анализ [40] функциональных возможностей современных АСДУ показывает, что их развитие было направлено на решение задач мониторинга и отображения информации о состоянии электросетевой инфраструктуры.

В существующих программно-технических комплексах реализованы средства сбора телеметрии, визуализации режимных параметров, регистрации технологических нарушений и формирования оперативной отчётности [48; 656551]. Однако функции интеллектуальной поддержки принятия решений при организации аварийно-восстановительных работ реализованы в них ограниченно.

В частности, существующие системы управления технологическими нарушениями и отключениями позволяют фиксировать факт аварии и формировать заявки на выполнение работ, а интеграция SCADA-систем с геоинформационными платформами позволяет выбирать оптимальный маршрут движения бригады. Однако выбор конкретной оперативно-выездной бригады осуществляется диспетчером на основе анализа разрозненной информации из различных информационных систем [100].

Как отмечается в ряде исследований [77; 136], существующие решения в основном направлены на улучшение мониторинга состояния электрических сетей и прогнозирование технологических нарушений, тогда как задачи комплексной оптимизации состава, оснащения и маршрута движения оперативно-выездных бригад остаются недостаточно формализованными.

Вместе с тем, анализ работы диспетчером в реальных диспетчерских центрах электросетевых компаний [40] показал, что значительная часть информации

о состоянии сети распределена между несколькими независимыми приложениями и экранами, что требует от оператора постоянного переключения внимания между различными источниками данных и выполнения дополнительных операций по поиску и сопоставлению информации.

Кроме того, информация из различных систем, анализируется диспетчером отдельно, в рамках интерфейсов соответствующих приложений. Каждая система отражает лишь отдельный аспект состояния электросетевой инфраструктуры или доступности ресурсов. В результате формирование целостной оценки текущей ситуации и готовности оперативно-выездных бригад требует от диспетчера самостоятельного сопоставления данных из нескольких источников. При этом единая метрика, позволяющая количественно оценить степень готовности бригады к выполнению аварийно-восстановительных работ с учётом всей совокупности факторов в существующих системах отсутствует.

В результате существующие АСДУ обеспечивают лишь базовую информационную поддержку диспетчерского управления, однако в полной мере не решают задачу выбора оптимального состава, оснащения и маршрута движения оперативно-выездной бригады. Также отсутствует учет неполноты, временной рассинхронизации и семантической неоднородности информации, поступающей из различных источников. Следовательно, формирование целостного представления о текущей ситуации требует от диспетчера самостоятельного сопоставления значительного объёма разрозненных данных.

Отсутствие методов комплексной количественной оценки готовности бригад и алгоритмов быстрого выбора наилучшей альтернативы затрудняет обеспечение требуемой оперативности принятия диспетчерских решений при ликвидации технологических нарушений.

Данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки методов интеллектуальной поддержки принятия решений о составе, оснащении и маршруте движения оперативно-выездной бригады электросетевой компании при проведении аварийно-восстановительных работ.

1.2 Методы управления оперативно-выездными бригадами при назначении на аварийно-восстановительные работы

Развитие информационных технологий и методов анализа данных позволяет исследовать и применять новые подходы к поддержке диспетчера при управлении оперативно-выездными бригадами, направленные на повышение эффективности принятия решений за счёт анализа большого объёма разнородной информации и формализованной оценки альтернативных вариантов действий. Актуальность разработки методов интеллектуальной поддержки принятия решений в электроэнергетике обусловлена стратегическими задачами развития отрасли, сформулированными в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года. В документе отмечается необходимость повышения надёжности функционирования электроэнергетической инфраструктуры, внедрения цифровых технологий управления и развития интеллектуальных систем обработки данных, обеспечивающих повышение эффективности эксплуатации энергетических объектов, оперативность принятия решения при назначении ОВБ на ликвидацию аварии и сокращение времени обесточивания.

В задачах принятия управленческих решений, характеризующихся необходимостью одновременного учёта нескольких критериев эффективности, широкое распространение получили методы многокритериального принятия решений. Данные методы зарекомендовали себя как эффективный инструмент выбора рациональной альтернативы при наличии фиксированного набора критериев и исходных данных.

В классической постановке задачи предполагается относительная стабильность информационной базы на момент проведения оценки: альтернативы формируются заранее, критерии задаются априорно, а процедура их ранжирования осуществляется на основе согласованной и полной информации. Такой подход позволяет формализовать процесс выбора и обеспечить прозрачность процедуры оценки альтернатив.

В практических задачах управления оперативно-выездными бригадами условия применения указанных методов оказываются значительно более

сложными. Многокритериальность в данной области обусловлена не только необходимостью учитывать различные показатели эффективности, но и особенностями самой системы управления электроэнергетикой, в которой одновременно присутствуют несколько целей, ограничений и субъектов управления. К числу таких факторов относятся, например, минимизация времени восстановления электроснабжения, обеспечение безопасности работ, ограниченность ресурсов, экономическая эффективность, а также требования к надежности функционирования электрической сети.

При этом, допущение о статичности исходной ситуации существенно ограничивает применимость классических MCDM-методов в задачах оперативного управления ОББ, где параметры обстановки изменяются в ходе самого процесса принятия и реализации решения.

Применительно к задаче управления ОББ в электроэнергетике многокритериальность возникает не из-за недостатка информации или несовершенства методов, а потому что сама система управления организована таким образом, что включает несколько целей, ограничений и субъектов, интересы которых объективно различаются. Например, скорость восстановления, безопасность, стоимость, качество и надёжность, ограничение ресурсов. При этом исходные данные неполны и находятся в различных источниках, функционирующих в составе отдельных информационных систем, что усложняет их согласование, интеграцию и оперативное использование в процессе принятия управленческих решений. Именно поэтому, современные платформы управления распределительными сетями [28] определяются в отраслевых отчётах, как интеграция множества систем, автоматизация восстановления и координация ремонтных/оперативных действий.

В существующей практике решения задачи выбора маршрута движения или оснащения бригады при проведении аварийно-восстановительных работ можно выделить ряд многокритериальных методов [76; 78; 79; 80; 82; 83; 90; 91; 94; 98; 99; 102; 104; 107; 117; 119; 121; 123; 126; 128; 129; 138] по уровню принимаемого решения:

1) Уровень выбора – ранжирование и отбор альтернатив при фиксированном наборе вариантов (выбор бригады, формирование состава, определение приоритета аварийно-восстановительных работ, выбор варианта плана действий). Для данного уровня принципиальное значение имеют интерпретируемость результатов и возможность формализации предпочтений лица, принимающего решение, включая определение весов критериев, пороговых значений и допустимых компромиссов.

2) Уровень оптимизации – построение самих альтернатив как результата вычислительной процедуры (маршрутизация бригад, составление расписаний, определение последовательности восстановительных операций, реконфигурация сети). В данном случае формируется вектор целевых функций, и решение ищется в виде множества Парето-оптимальных вариантов с последующим выбором предпочтительного решения по заданным правилам.

3) Уровень реального времени – динамическое планирование, методы марковских процессов принятия решений, алгоритмы обучения с подкреплением, а также многоагентные модели координации, обеспечивающие адаптацию планов к поступающей информации и изменяющимся условиям функционирования сети.

Наиболее часто используемыми MCDM методами являются:

- а) аналитический иерархический процесс (далее – АИП);
- б) аналитический сетевой процесс (далее – АСП);
- в) метод упорядоченного предпочтения по сходству с идеальным решением (далее – TOPSIS);
- г) метод испытаний и оценки принятия решений (далее – DEMATEL);
- д) исключение и выбор в условиях реальности (далее – ELECTRE);
- е) метод организации сортировки предпочтений для оценок альтернатив (далее – PROMETHEE);
- ж) многокритериальная оптимизация и компромиссное решение (далее – VIKOR).

Каждый из них обладает определёнными методическими преимуществами применительно к решению задачи управления ОББ в части многокритериального выбора альтернатив оснащения и маршрута движения бригад,

а также при формировании приоритетов выполнения аварийно-восстановительных работ. Вместе с тем, несмотря на многочисленность и развитость данных методов, их возможности в задачах оперативного диспетчерского управления ОВБ остаются ограниченными. Большинство из них ориентировано на аналитические и статичные постановки задач, тогда как реальные условия ликвидации аварии в электроэнергетике характеризуются дефицитом времени, неполнотой сведений, изменчивостью обстановки и необходимостью многократного уточнения решения по мере поступления новой информации. Вследствие этого существующие научно-методические аппараты в ряде случаев обеспечивают лишь формальную поддержку выбора, но не позволяют гарантировать требуемую оперативность и обоснованность назначения ОВБ на аварийно-восстановительные работы.

Метод аналитического иерархического процесса используется преимущественно для построения системы весов критериев в условиях их разнородности (время, риск, стоимость, социальная значимость отключений). Он основан на попарных сравнениях и обеспечивает интерпретируемую логику формирования весов, согласованную экспертами. В задачах управления ОВБ данный подход позволяет формализовать предпочтения диспетчерского персонала и согласовать их с нормативными требованиями безопасности и качества электроснабжения.

Методы TOPSIS и VIKOR ориентированы на ранжирование альтернатив по степени близости к идеальному решению. Они широко применяются в энергетике при выборе оптимальных вариантов технических и организационных решений, включая оценку сценариев восстановления сети. В рамках управления ОВБ данные методы позволяют учитывать одновременно несколько критериев (время прибытия, уровень риска, ожидаемая длительность работ, приоритет потребителей) и обеспечивать прозрачность процедуры выбора. Однако, TOPSIS и VIKOR используются преимущественно для однократной процедуры ранжирования и не предоставляют механизмов оперативной корректировки решения при изменении параметров обстановки.

Методы ELECTRE и PROMETHEE относятся к классу методов отношения предпочтения и предназначены для ситуаций, в которых критерии не должны

полностью компенсировать друг друга. Указанные методы позволяют вводить пороговые значения и учитывать неполную или нечёткую информацию, что повышает адекватность моделирования реальных управленческих ограничений.

Несмотря на перечисленные преимущества, классические методы MCDM применяются в условиях статического выбора альтернатив при фиксированном наборе данных. При этом, исходные данные в задачах управления оперативно-выездными бригадами поступают асинхронно, могут быть неполными и изменяются во времени (динамика повреждений, погодные условия, занятость бригад, изменение дорожной обстановки).

Кроме того, методы MCDM ориентированы на ранжирование заранее сформированного множества альтернатив и, как правило, не предусматривают механизмов их генерации в процессе вычислений. В задачах управления ОББ альтернативы формируются непосредственно в процессе решения задачи и зависят от текущего состояния системы и доступных ресурсов. Это требует применения моделей и алгоритмов, способных учитывать динамическое изменение параметров задачи и формировать альтернативные решения в режиме реального времени. Следовательно, ограничение данных методов состоит не только в том, что они работают с неполной информацией, но и в том, что они практически не учитывают саму динамику процесса принятия решения, когда значимые параметры задачи изменяются быстрее, чем завершается процедура оценки альтернатив.

Существенным ограничением также является то, что большинство MCDM-методов предполагает наличие согласованной системы критериев и стабильных весовых коэффициентов. В реальных условиях эксплуатации электрических сетей при ликвидации технологических нарушений значимость критериев может изменяться в зависимости от оперативной обстановки, категории потребителей, масштаба повреждения и доступности ресурсов. В этих условиях фиксированные веса критериев могут приводить к искажению оценки альтернатив и снижению эффективности принимаемых решений.

Таким образом, применение классических методов MCDM без учёта динамики процесса управления оперативно-выездными бригадами и особенностей поступления исходных данных приводит лишь к формальному ранжированию альтернатив [81] и не обеспечивает решение задачи оперативного формирования параметров бригады (состава, оснащения и маршрута движения) при проведении аварийно-восстановительных работ.

Следовательно, использование классических методов MCDM является недостаточным для решения задачи обеспечения заданной оперативности принятия оптимального решения о составе, оснащении и маршруте движения оперативно-выездной бригады при проведении аварийно-восстановительных работ в условиях неполноты и неоднородности исходных данных.

Анализ показал, что наиболее часто используемыми критериями в задачах управления ОВБ являются: расстояние, интенсивность движения, геометрические характеристики сети и время в пути, погода и осадки, наличие требуемого оборудования. Данные критерии действительно оказывают существенное влияние на обеспечение заданной оперативности принятия оптимального решения о составе, оснащении и маршруте движения оперативно-выездной бригады электросетевой компании при проведении аварийно-восстановительных работ. Однако стоит отметить, что исследования не учитывают параметры человека в задачах оптимизации.

Таким образом, несмотря на значимость перечисленных критериев, признаки, учитываемые в рамках традиционных MCDM-подходов ограничены преимущественно логистическими и техническими параметрами. Человеческий фактор либо не включается в модель, либо рассматривается вне процедуры оптимизации. В результате ранжирование альтернатив осуществляется на основе статичного и неполного набора факторов, что может приводить к неверному решению диспетчера в реальных условиях эксплуатации.

Как следствие, возникает необходимость перехода к интеллектуальным адаптивным методам управления, интегрирующим многокритериальный анализ с учетом динамики процесса управления оперативно-выездными бригадами. Это обуславливает необходимость разработки научно-методического аппарата,

обеспечивающего формализованный выбор состава, технического оснащения и маршрута движения оперативно-выездной бригады на основе комплексной оценки её готовности, а также условий неполноты, рассинхронизации и семантической неоднородности поступающих данных при соблюдении требований к оперативности принятия управленческих решений.

1.3 Математические модели управления оперативно-выездными бригадами

Проведённый анализ методов управления оперативно-выездными бригадами показывает, что существующие подходы позволяют формализовать отдельные аспекты процесса принятия решений, однако их применение в задачах оперативного управления аварийно-восстановительными работами ограничено. Прежде всего, это связано с динамическим характером процесса управления ОВБ, необходимостью одновременного учета множества взаимосвязанных параметров, а также неполнотой и неоднородностью исходных данных, поступающих из различных информационных систем.

В этих условиях применение только процедур многокритериального выбора оказывается недостаточным, поскольку такие методы эффективны преимущественно при статическом ранжировании заранее сформированных альтернатив. Для решения задачи обеспечения заданной оперативности принятия решений при назначении оперативно-выездных бригад требуется формализованное описание самого процесса управления, позволяющее учитывать динамику изменения состояния системы, взаимосвязь факторов и влияние неопределенности данных.

Таким образом, формирование научно-методического аппарата управления оперативно-выездными бригадами предполагает использование математических моделей, позволяющих описывать структуру задачи, учитывать взаимодействие техники, логистики и человека, а также обеспечивать вычислительную поддержку процесса принятия решений. В этой связи представляет интерес анализ

существующих подходов к математическому моделированию процессов управления и восстановления электроснабжения.

В работах российских и зарубежных авторов описано применение интеллектуальных методов для управления и оптимизации ремонтных работ [37], как определение мест повреждений линий электропередачи, диагностики систем и прогнозирования надежности на основе нейронных сетей [62], применение теории нечетких множеств для оценки рисков [3636]. Онтологический инжиниринг систем ситуационного управления, поддержки принятия решений в области электроэнергетики рассмотрен в исследовании [55]. Значительное число работ [68] посвящено анализу надежности систем электроснабжения на основе имитационного моделирования.

Так, в Калининградской области, как описано А.В. Колесниковым [47], внедрение подстанций закрытого типа с автоматизированными системами управления позволило значительно сократить время оперативных переключений.

В Тюменской области, согласно исследованиям Ставицкого А.В., Сашиной Н.В. [66], внедрение системы диспетчерского управления СК-11 и видеостен позволило улучшить мониторинг электрических сетей.

В целом, интеллектуальные методы управления оперативно-выездными бригадами в электросетевых компаниях можно классифицировать на: оптимизационные модели распределения ресурсов и маршрутизации, методы теории массового обслуживания, платформенные решения класса систем управления отключениями и интегрированных систем управления распределительными сетями, а также методы машинного обучения и искусственного интеллекта и гибридные комбинации указанных групп.

Оптимизационные модели.

Оптимизационные модели составляют основу математического аппарата управления оперативно-выездными бригадами при ликвидации аварий в распределительных электрических сетях. Их основная цель – формализация задачи назначения бригад и построения маршрутов таким образом, чтобы обеспечить минимизацию времени восстановления электроснабжения, минимизацию эксплуатационных затрат и повышение показателей надежности.

Наиболее распространено использование:

- смешанное целочисленное линейное программирование (MILP);
- задачи маршрутизации транспортных средств (VRP);
- многоцелевые задачи (Multi-Objective Optimization);
- эволюционные алгоритмы (NSGA-II, MOPSO).

Характерной особенностью данного класса моделей является строгая формализация ограничений, включая количество бригад, сменность, допустимые маршруты, длительность ремонта и приоритетность потребителей. Эта особенность обеспечивает интерпретируемость и воспроизводимость решений, а также возможность интеграции моделей в системы диспетчерского управления (OMS, ADMS).

В современных исследованиях всё чаще рассматриваются задачи совместной оптимизации восстановительных работ для повышения эффективности и оперативности управления процессом восстановления. Работы, подобные исследованиям Y. Yang (координация энерго-водных систем) [137] и S. Lei (интеграция логистики бригад, мобильных источников питания и восстановления сети) [114], доказывают, что синергетический учёт временных, пространственных и ресурсных связей даёт значительный прирост во времени и эффективности.

Вместе с тем применение оптимизационных моделей имеет ряд ограничений. Во многих работах вычислительная проверка осуществляется на упрощённых сценариях (фиксированные времена ремонта, ограниченный набор ресурсов, упрощённые параметры поступления заявок). При увеличении числа повреждений и объектов сети существенно возрастает вычислительная сложность задачи, что требует применения эвристик или редукции топологии сети. Кроме того, большинство моделей носят детерминированный характер и чувствительны к точности исходных данных. На практике же неопределённость повреждений, неполнота информации и динамика поступления заявок могут снижать адекватность получаемых решений.

В этих условиях может быть эффективна разработка численных методов решения задач управления аварийно-восстановительными работами, обеспечивающих получение рациональных решений в допустимые временные

интервалы при обработке разнородных и динамически изменяющихся данных. Применение численных методов позволяет реализовать вычислительные процедуры поиска параметров управления, включая определение состава, оснащения и маршрута движения оперативно-выездных бригад, на основе динамических моделей процесса восстановления сети.

При этом, отдельной проблемой является слабый учет факторов исполнения: доступности и сменности персонала, состояния техники, дорожной обстановки, погодных условий и динамики развития аварии. В российском контексте дополнительные ограничения связаны с нормативной ответственностью за переключения и необходимостью обеспечения прослеживаемости и проверяемости принимаемых решений.

Стохастические и вероятностные модели.

Стохастические модели используются для учета неопределенности, присущей процессу аварийного восстановления сети. В реальных условиях время устранения повреждения, объем работ, доступность персонала и воздействие внешних факторов (погодные условия, массовые отказы) носят случайный характер. Для учета таких факторов применяются методы стохастического программирования, робастной оптимизации, сценарного анализа, марковские процессы и нечеткие множества.

Преимуществом данного класса является повышение устойчивости принимаемых решений к вариативности исходных параметров и возможность моделирования различных сценариев развития аварийной ситуации. Это особенно важно при массовых повреждениях, вызванных экстремальными природными воздействиями. Однако усложнение математической постановки приводит к увеличению размерности задачи и росту вычислительной нагрузки. Дополнительной проблемой является необходимость наличия достоверной статистики для корректной калибровки вероятностных распределений.

Имитационные и дискретно-событийные модели.

Имитационно-моделирующие подходы применяются для описания ремонтной деятельности как стохастического многоэтапного процесса (поступление заявок, перемещения, выполнение работ, потребление ресурсов)

и для оценки влияния территориальной разобщённости объектов и многоуровневости управления. Такой класс моделей представлен в работах Н.С. Уразалиева, В.С. Тумпурова и А.А. Хановой [46; 69] по логистическим процессам управления ремонтами в районах электрических сетей. Эффективность имитационного моделирования связана с возможностью учитывать фактор случайности и выявлять деструктивные факторы во внутренних логистических процессах обслуживания и ремонтов. При этом стоит отметить, что такие модели требуют качественные детализированные исходные данные (время операций, параметры перемещений, загруженность дорог), а также то, что имитационная модель, как правило, служит инструментом анализа и сравнения сценариев и не заменяет оптимизационную процедуру оперативного назначения бригад в реальном времени. Также выражаются сомнения о переносимости данных моделей на реальные условия эксплуатации.

Известен методический аппарат в части оптимизационных моделей ориентированный на формализованное распределение заданий между бригадами, выбор очередности и маршрутов с учётом неопределённости повреждений и времени работ. В качестве примера можно указать постановку задачи диспетчеризации бригад после шторма [131] как последовательной стохастической оптимизации, где состояние сети уточняется по обращениям потребителей и данным обследования, а решения формируются методами поиска по дереву Монте-Карло в сочетании с нейросетевой аппроксимацией. Анализ показал, что оптимизационные модели маршрутизации являются эффективными и позволяют уменьшать суммарную длительность отключений и формально учитывать неопределённость, однако во многих работах [1515; 46; 66] вычислительная проверка опирается на упрощённые сценарии (например, заданные времена ремонта, фиксированные параметры сообщения потребителей, ограниченный набор типов ресурсов). При этом, стоит отметить, что имитационные модели, как правило, не обеспечивают получение оптимального решения в явной форме, а служат инструментом анализа сценариев [112]. Кроме того, сложность построения и оценки имитационной модели может ограничивать её практическое применение.

Модели машинного обучения.

В ряде исследований для повышения эффективности управления аварийно-восстановительными работами применяются модели машинного обучения, ориентированные преимущественно на прогнозирование параметров, влияющих на процесс управления оперативно-выездными бригадами. К таким параметрам относятся ожидаемое время устранения повреждений, вероятность отказа оборудования, приоритетность заявок на восстановление, а также оценка объёма предстоящих ремонтных работ. Полученные прогнозные оценки используются как входные данные для последующего планирования и принятия управленческих решений.

Современные исследования [28] демонстрируют переход от статических к адаптивным подходам. Так, Т. Ding рассматривает маршрутизацию ремонтных бригад, интегрируя в модель мобильные автомобили, что требует учета постоянно меняющейся оперативной обстановки [91]. В работе, [110] ученые показывают необходимость учета взаимозависимости транспортных средств при планировании ресурсов.

Методы ансамблевого обучения, опорных векторов и алгоритмы градиентного бустинга, позволяют выявить нелинейные зависимости между параметрами функционирования энергосистемы и характеристиками аварийно-восстановительных процессов на основе анализа исторических данных.

Вместе с тем, применение методов машинного обучения в задачах управления оперативно-выездными бригадами имеет ряд ограничений. Как правило, такие методы позволяют анализировать данные и на основании анализа строить прогноз совершения события. Однако, они не формируют комплексное управленческое решение. Кроме того, их эффективность существенно зависит от объёма и качества обучающей выборки.

Модели глубокого обучения.

В задачах управления ОВБ модели глубокого обучения используются для прогнозирования отказов оборудования по большим массивам данных. Такие модели способны учитывать сложные пространственные и временные зависимости, а также автоматически формировать высокоуровневые

представления данных. Наиболее перспективными выглядят методы, основанные на машинном обучении, в частности, обучении с подкреплением (Reinforcement Learning, далее – RL). Например, F. Amani и др. применяют RL для определения оптимального распределения бригад после землетрясения, что позволяет системе адаптироваться к непредвиденным повреждениям и меняющимся условиям [74]. R. Si и соавт. предлагают метод распределенного восстановления на основе многоагентного RL с учетом динамической реконфигурации сети, что соответствует идее децентрализованного, но скоординированного управления в сложной среде [132].

Стоит отметить, что данные модели требуют значительных вычислительных ресурсов и больших объемов обучающих данных. Их интерпретируемость остается ограниченной, что может затруднять внедрение в критически важные системы управления. Кроме того, модели глубокого обучения, как правило, выполняют функцию прогнозирования и не формируют управленческие решения без последующей интеграции с оптимизационными алгоритмами.

Гибридные модели.

Гибридные модели представляют собой интеграцию различных классов математических моделей в единую систему поддержки принятия решений. Как правило, они объединяют в себе преимущества методов машинного и глубокого обучения с процедурами многокритериальной оценки и оптимизационными алгоритмами назначения и маршрутизации оперативно-выездных бригад.

Гибридные модели позволяют комплексно учитывать деструктивные факторы развития аварийной ситуации. Также гибридные модели обеспечивают более высокую устойчивость принимаемых решений по сравнению с применением отдельных методов оптимизации или машинного обучения.

При этом гибридные модели имеют высокую архитектурную сложность, требующую развитой цифровой инфраструктуры. Также, согласование компонентов (ML, MCDM, оптимизация) требует регулярной калибровки и валидации, что увеличивает требования к качеству и полноте исходной информации. В-третьих, даже при гибридной архитектуре признаковое

пространство зачастую формируется преимущественно на основе технических и логистических параметров, тогда как параметры человека (сотрудника) остаются либо усреднены, либо вынесенными за пределы основной модели.

Наиболее перспективным направлением развития является построение гибридных моделей, интегрирующих прогнозные возможности ML/DL с оптимизационными и многокритериальными методами. Такие системы позволяют учитывать неопределенность, приоритетность потребителей и ресурсные ограничения одновременно. Однако их внедрение требует развитой цифровой инфраструктуры, унифицированных баз данных и значительных вычислительных ресурсов.

В целом можно заключить, что эффективная система управления ОБВ должна строиться на основе многоуровневой архитектуры, в которой:

- прогнозные модели формируют вероятностную оценку параметров аварийной ситуации;
- многокритериальные методы обеспечивают ранжирование повреждений;
- оптимизационные алгоритмы реализуют назначение и маршрутизацию бригад;
- имитационные модели используются для стратегического анализа и валидации политики управления.

Анализ перечисленных подходов показывает, что существующие подходы к управлению ОБВ учитывают логистику и наличие необходимого оборудования и почти не учитывают человеческий фактор (состояние электромонтера, бригады, диспетчера) и комплексную оценку всех факторов совместно, что приводит к ошибкам в назначениях и задержкам восстановления, рискам травматизма и снижению эффективности аварийно-восстановительных работ. Ряд работ на основе нечеткой логики, как показано в работах О. Blyskun [86] и L. Bukowski [88], используют для оценки качественных и экспертных показателей, таких как уровень квалификации или усталости персонала. Однако эти методы, как отмечалось ранее носят сильно зависимый от экспертов и данных характер.

В целом, рассмотренные алгоритмы обычно предполагают «среднего бригадира» без учёта его допусков и состояния [10; 24]. Также существуют подходы, связанные с косвенной поддержкой принятия решений диспетчера за счёт улучшения эргономики интерфейсов на основе оценки когнитивной нагрузки [30]. Как правило, такие оценки по нагрузке формируются на основе самоотчётов диспетчеров и экспертных суждений, то есть зависят от индивидуального восприятия и памяти специалиста и носят ретроспективный характер (опросы, анкеты, экспертные оценки).

Есть ряд подходов, которые пытаются снизить когнитивную нагрузку диспетчера. Так в работе [25] Д.Б. Гвоздева рассматривается подход по поддержанию информационного гомеостаза диспетчера, для снижения нагрузки. Суть подхода гомеостаза оператора заключается в том, чтобы рассматривать информационное состояние диспетчера как критический ресурс и основной фактор надёжности. Цель – не заменить человека, а создать такие условия (инструменты и системы), которые позволят ему оставаться в состоянии устойчивого равновесия, обрабатывая растущие объёмы информации и управляя все более сложными системами без потери качества и скорости принятия решений. Мацеевич С.В. [57] предлагает подход с применением снижения когнитивной нагрузки диспетчера путем внедрения программного обеспечения с агрегированием и цветовой идентификацией информации. Однако, все же основную нагрузку по ликвидации аварии несет именно бригада или каждый электромонтер, в частности и целесообразным представляется учитывать именно их состояние.

При этом, человеческий фактор оказывает существенное влияние на восстановление после аварий: низкая квалификация или неправильные допуски приводят к неверной оценке объёма и сложности работ, ошибка при вводе данных или приёме вызова приводит к ошибкам выбора (например, бригада едет не по адресу) [10], а усталость и длительные смены приводят к росту числа ошибок [24]. Недостаток коммуникации с бригадой (сбой связи, нерешённые на месте вопросы) задерживает развёртывание работ [63], а ослабленное соблюдение техники безопасности (отсутствие спецодежды, игнорирование инструкций)

повышает риск ЧС. Существующие методы формализации ОВБ в моделях редко содержат эти параметры: эвристики и математические модели обычно считаются «чёрным ящиком» с фиксированными временами работ; имитация логистики чаще моделирует транспорт и заявки, но не учитывает эффективность конкретных бригад; алгоритмы оптимизации / искусственного интеллекта (далее – ИИ) рассчитаны на усреднённые данные и не учитывают личностные отличия (например, опыт или утомляемость) [24; 63]. Последствием игнорирования человеческого фактора становятся неоднократные переназначения одних и тех же бригад, переработки и простои, заниженное качество техобслуживания, а также нарушения норм безопасности [10; 24; 63].

Следовательно, необходимо включить параметры человеческого фактора в модели диспетчерского управления ОВБ.

Анализ перечисленных подходов показывает наличие ограничений в исследованиях, которые непосредственно проявляются на уровне регионального диспетчерского управления (далее – РДУ) при организации аварийно-восстановительных работ. Во многих постановках не обеспечивается полнота учёта факторов исполнения: помимо собственно маршрута и времени ремонта часто остаются неформализованными доступность и сменность персонала, наличие и готовность специальной техники, инструментов и материалов, транспортные ограничения, погодная обстановка и динамика поступления заявок. Тогда как классические модели ремонтного процесса подчёркивают зависимость результата от качества и количества ремонтных ресурсов и организации работ как системы массового обслуживания. Для методов машинного обучения и искусственного интеллекта характерно использование упрощённых представлений о бригаде (однородность ресурсов, усреднённые времена операций) и редуцирование требований безопасности к косвенным ограничениям, хотя на практике компетенции, утомляемость и безопасность электромонтёра определяют допустимость темпа и последовательности работ не меньше, чем расчётные критерии оптимальности.

Отдельная проблема – слабая интеграция алгоритмов с диспетчерскими информационными системами: при объединении нескольких прикладных модулей

управления в платформе OMS / ADMS возникают конфликты управляющих воздействий и возрастает роль корректного распределения функций между автоматикой и диспетчером (включая контроль переключений и координацию выездных ресурсов). В российском контексте эти ограничения усиливаются нормативной ответственностью за переключения и обязательностью исполнения диспетчерских команд, поэтому интеллектуальные решения должны быть встроены в региональный цикл РДУ / АСДУ с обеспечением прослеживаемости, проверяемости и двусторонней обратной связи по факту исполнения.

Проведенный анализ текущих подходов к формированию и назначению оперативно-выездных бригад в электросетевой компании с учетом отечественного опыта ОДУ позволяют выделить следующие направления для получения новых научных результатов:

1) Отсутствие формализованного механизма интеграции разрозненных данных о ресурсах в единую оперативную модель. Информация о состоянии сети и информация о готовности, местоположении и оснащённости ОВБ существуют в разных системах, форматах и зонах ответственности (ОДУ / ОТУ). Нет модели, которая бы обеспечивала их семантическое согласование и консолидацию в реальном времени. Разработка модели и методики семантической медиации неоднородных данных для формирования целостного информационного профиля аварийно-восстановительных работ, включающего как параметры повреждения, так и атрибуты доступных ресурсов (бригад).

2) Отсутствие количественного, агрегированного критерия для оценки и сравнения готовности бригад к выполнению конкретной заявки. Выбор бригады часто осуществляется субъективно, на основе опыта диспетчера, без учёта всей совокупности влияющих факторов (квалификация, усталость, логистика, оснащённость). Нет формального показателя, который бы интегрировал эти разнородные факторы в единую меру эффективности. Разработка метода формирования комплексного показателя готовности ОВБ и методики определения весовых коэффициентов для его составляющих («Человек», «Техника», «Логистика») на основе экспертных оценок и исторических данных.

3) Отсутствие адаптивной модели управления, связывающей текущее состояние работ с целевыми нормативами через управление бригадами. Нет формальной модели, которая бы в условиях неполной информации динамически определяла, какое управляющее воздействие (назначение конкретной бригады) необходимо для перевода системы из текущего состояния в целевое (восстановление в нормативный срок). Разработка динамической модели оперативного управления ОВБ, формулируемой как задача поиска оптимального соответствия «заявка – бригада» в реальном времени с целью достижения заданного уровня оперативности.

1.4 Постановка цели и задач исследования

С учетом проведенного обзора и анализа состояния вопроса эффективности ОДУ была сформулирована цель данного исследования, а именно: разработка модели и численного метода оперативного управления ОВБ электросетевой компании, обеспечивающих своевременное восстановление электроснабжения за нормативное время в условиях неоднородности, асинхронности и неполноты исходных данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующую общую научную задачу: разработать модель и численный метод, обеспечивающие оперативное формирование и назначение ремонтных бригад с учётом неоднородных данных для достижения целевых показателей восстановления энергоснабжения в установленные нормативные сроки.

Для решения общей научной задачи её необходимо декомпозировать на следующие взаимосвязанные частные научные задачи:

1) Разработка модели взаимодействия участников процесса управления аварийно-восстановительными работами для оперативного формирования и корректировки планов назначения оперативно-выездных бригад.

Модель должна учитывать:

- заданные нормативные сроки восстановления;
- текущее состояние оборудования;

- ресурсные ограничения бригад;
- влияние деструктивных факторов.

Модель должна интегрировать данные из разнородных источников и поддерживать динамическую адаптацию планов.

2) Разработка численного метода оперативного формирования состава и назначения ОВБ, включающей:

- метод расчёта агрегированного показателя готовности бригады, учитывающего её оснащённость, квалификацию, текущую загрузку и географическое положение;
- метод определения весовых коэффициентов для данного агрегированного показателя на основе экспертных оценок и статистики прошлых работ;
- метод нормализации, согласования и обогащения неоднородных исходных данных для их пригодности к использованию в моделях принятия решений.

3) Разработка практических рекомендаций по созданию программного комплекса для оперативного формирования и корректировки планов назначения ОВБ, обеспечивающего интеграцию с существующими диспетчерскими и геоинформационными системами электросетевой компании.

Сформулируем формальную постановку задачи управления оперативно-выездными бригадами.

Пусть:

$B = \{b_1, b_2, \dots, b_{N_B}\}$ – множество всех бригад электросетевой компании;

$I = \{i_1, i_2, \dots, i_{M_I}\}$ – множество инцидентов (аварийных ситуаций);

T – множество моментов времени, в которые может приниматься управленческое решение.

Тогда состояние оперативно-выездной бригады в момент времени t можно описать вектором (1)

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

где $s_{b,i}(t)$ – вектор состояния бригады b применительно к инциденту i в момент времени t ;

$H_{b,i}(t)$ – показатель готовности подсистемы «Человек»;

$E_{b,i}(t)$ – показатель готовности подсистемы «Техника»;

$L_{b,i}(t)$ – показатель готовности подсистемы «Логистика»;

T – операция транспонирования, представляющая координаты в виде вектора-столбца.

В настоящей работе задача оптимального управления рассматривается как дискретно-динамическая задача. В моменты принятия решения управляющей переменной является выбор допустимой конфигурации и назначения оперативно-выездной бригады, определяющих её состав, оснащение и маршрут следования. Для каждой рассматриваемой допустимой альтернативы управляющие воздействия динамической модели задаются в соответствии с данной конфигурацией и используются для прогнозирования изменения состояния бригады во времени.

Изменение этого состояния во времени задается функцией изменения динамики состояния, по формуле (2)

$$\dot{s}_{b,i}(t) = F_{b,i}(s_{b,i}(t), u_{b,i}(t), d_{b,i}(t)), \quad (2)$$

где $\dot{s}_{b,i}(t)$ – скорость изменения состояния пары «бригада – инцидент»;

$F_{b,i}$ – функция динамики состояния (20), определяется основными положениями модели, используемыми приближениями и спецификой конкретной задачи;

$u_b(t)$ – управляющие воздействия, применяемые к бригаде b ;

$d_i(t)$ – деструктивные факторы, связанные с инцидентом i и внешней средой.

Пространство состояний динамической модели, определяется выражением (3)

$$S(t) = \{s_{b,i}(t) \mid b \in B, i \in I, t \in T\}. \quad (3)$$

Вектор (1) является единственным формальным представлением состояния бригады в рассматриваемой модели. Все дальнейшие преобразования и вычисления строятся на основе этого вектора.

Модель управления оперативно-выездными бригадами может быть адекватно описана алгебраической системой (4)

$$M = \langle Z, O, D, U, \Xi, \Phi \rangle, \quad (4)$$

где M – модель управления ОВБ;

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

O – множество операторов преобразования данных, формирования состояния и расчёта 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».

Комплексный показатель оперативной готовности бригады b к выполнению работ по инциденту i в момент времени t обозначим может быть представлен функцией агрегации, задаваемой формулой (5)

$$G_{b,i}(t) = \Phi \left(H_{b,i}(t), E_{b,i}(t), L_{b,i}(t) \right), \quad (5)$$

где $G_{b,i}(t)$ – комплексный показатель оперативной готовности бригады b к работам по инциденту i в момент t .

В общем случае функция Φ должна обеспечивать переход от вектора частных показателей $H_{b,i}(t), E_{b,i}(t), L_{b,i}(t)$ к единому показателю оперативной готовности, пригодному для сравнения альтернатив назначения бригад.

Выбор ОВБ для выполнения заявки на восстановление осуществляется на основе максимизации агрегированного показателя эффективности. Формально задача назначения бригады описывается выражением (6)

$$b^*(t) = \arg \max_{b \in B_i^{adm}(t)} G_{b,i}(t), \quad (6)$$

где $b^*(t)$ – оптимальная бригада для одного инцидента;

$B_i^{adm}(t)$ – множество допустимых бригад;

$G_{b,i}(t)$ – комплексный показатель оперативной готовности бригады, характеризующий степень готовности бригады к выполнению аварийно-восстановительных работ.

Процесс оперативного управления осуществляется при выполнении следующих ограничений, задаваемых системой неравенств (7)

$$\begin{cases} t_{b,i} \leq t_i^{norm} \\ H_{b,i}(t) \geq H_i^{min} \\ E_{b,i}(t) \geq E_i^{min} \\ L_{b,i}(t) \geq L_i^{min} \end{cases}, \quad (7)$$

где $H_i^{min}, E_i^{min}, L_i^{min}$ – минимально допустимые значения показателей человеческой, логистической и технической подсистем;

$t_{b,i}$ – расчётное время прибытия и выполнения АВР;

t_{norm} – нормативное время восстановления электроснабжения.

Таким образом, в общем виде задача исследования сводится к разработке модели M , которая обеспечивает преобразование текущего состояния аварийно-восстановительных работ в целевое состояние, соответствующее нормативному времени восстановления, с учётом совокупного влияния человеческого, технического и логистического факторов. В настоящей работе задача оптимального управления рассматривается как дискретно-непрерывная задача. Непрерывная составляющая описывает изменение состояния допустимой пары «бригада – инцидент» во времени, а дискретная составляющая определяет выбор состава, оснащения, маршрута и назначения бригады. Управляющие воздействия динамической модели соответствуют рассматриваемой управленческой альтернативе, а оптимальность решения определяется выбором допустимой альтернативы, максимизирующей прогнозный комплексный показатель оперативной готовности при выполнении заданных ограничений.

Выводы к главе 1

Анализ текущего состояния ОДУ в части формирования и назначения оперативно-выездных бригад ОБВ позволил систематизировать основные проблемы и определить направления разработки модели и численного метода оперативного управления ремонтными бригадами в условиях неоднородности данных. Далее перечислены основные результаты, полученные при работе над первой главой диссертации:

1) Установлено, что современное оперативно-диспетчерское управление (ОДУ) в энергокомпаниях эволюционировало от централизованной иерархии к распределённой цифровой экосистеме, интегрирующей автоматизированные системы технологического управления, учёта и поддержки принятия решений. При этом ключевыми сдерживающими факторами для эффективного управления, в частности ОБВ, остаются проблемы неполноты, асинхронности и семантической неоднородности данных, поступающих из различных источников (SCADA, системы учёта, геоинформационные сервисы, метеоданные). Эта неоднородность затрудняет формирование целостной оперативной картины, что приводит

к запаздыванию решений, неоптимальному распределению ресурсов и, как следствие, к увеличению времени восстановления энергоснабжения.

2) Анализ применения интеллектуальных методов показал значительный потенциал технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и электронного обучения для повышения эффективности формирования и назначения ОВБ. Реализованные в ряде регионов решения (например, использование ИЗЛ, интеллектуальных подстанций) подтверждают возможность сокращения времени реагирования за счёт автоматизации обнаружения повреждений, анализа данных и поддержки логистических решений. Тем не менее, существующие подходы часто носят фрагментарный характер и не предлагают комплексной модели, способной работать в условиях исходной семантической и структурной неоднородности информации.

3) На основании проведённого анализа была сформулирована цель исследования: разработка комплексной модели и численного метода оперативного управления ОВБ, обеспечивающей достижение целевых показателей восстановления энергоснабжения в установленные нормативные сроки.

Для решения этой цели необходимо:

- создать модель взаимодействия участников процесса, способную интегрировать неоднородные данные и динамически адаптировать планы назначения бригад;
- разработать численный метод, включающий выравнивание данных, оценку готовности бригад, определения весовых коэффициентов.
- подготовить рекомендации по программной реализации.

Решение этих задач позволит преодолеть выявленные системные противоречия и создать основу для интеллектуальной системы управления, сочетающей преимущества автоматизации с гибкостью принятия решений в сложных условиях.

Глава 2

Динамическая модель управления оперативно-выездными бригадами при проведении аварийно-восстановительных работ

В главе 1 установлено, что задача управления ОВБ при АВР требует одновременного учёта состояния персонала, технической готовности и логистической доступности в условиях неполноты и рассинхронизации данных. В связи с этим в настоящей главе ОВБ рассматривается как единый объект управления в пространстве «Человек – Техника – Логистика». Цель главы состоит в формализации динамической модели, позволяющей описать состояние бригады, область допустимых назначений и комплексный показатель оперативной готовности бригады.

2.1 Обоснование требований к динамической модели управления оперативно-выездными бригадами

Согласно нормативным документам [2; 3] диспетчер ЦУС должен принимать решение о ликвидации аварийных ситуаций в электрических сетях, включая выделение поврежденного участка сети, с последующим назначением ОВБ для восстановления электроснабжения потребителей в условиях ограниченного времени и значительной информационной нагрузки, связанной с обработкой разнородных данных о состоянии ресурсов и аварийной обстановке.

Анализ существующего порядка формирования плана ликвидации аварийной ситуации во многом основан на усреднённых оценках и опыте диспетчера [34; 42; 59; 64]. При этом данные из ERP-, HR-, SCADA- и иных систем обновляются асинхронно, имеют различную достоверность и семантику.

В совокупности указанные обстоятельства показывают, что управление бригадами с требуемой эффективностью не может быть достигнуто за счёт дальнейшего усложнения эвристических правил или увеличения объёма анализируемой информации, что обуславливает необходимость комплексной оценки состояния оперативно-выездной бригады.

Проведенные в диссертации исследования показали, что указанные ограничения носят системный характер и не могут быть устранены за счёт автоматизации отдельных операций (маршрутизация, поиск ближайшей бригады, контроль загрузки ресурсов). Следовательно, задача принятия решений не может быть сведена к оптимизации отдельного критерия или набору эвристических правил.

В этих условиях возникает необходимость перехода от эвристического описания процесса принятия решений к представлению состояния ОВБ, как целостного объекта управления, сохраняющего при этом человека (электромонтера, диспетчера) в активном контуре управления. Такой подход методологически соответствует эргатическим системам управления, в рамках которых автоматизированные средства не заменяют оператора, а обеспечивают структурирование информации, снижение неопределённости и повышение обоснованности решений. Исследования в области эргатических систем управления [25; 27] подтверждают, что в таких ситуациях человек оказывается элементом процесса принятия решения.

Современные методы поддержки принятия решений диспетчера в достаточной степени успешно решают отдельные задачи данной предметной области. Так, например, известны методы маршрутизации, оценки возможности поезда до места аварии или анализа когнитивной нагрузки диспетчера [28], но практически отсутствует научно-методический аппарат, позволяющий рассматривать ОВБ как единую функционально замкнутую систему, в которой человек, техника и логистика образуют неразрывный контур [13]. Между тем, именно такая постановка задачи отражает реальную структуру аварийно-восстановительных работ и соответствует фундаментальным положениям эргатического моделирования.

Классические эргатические модели, ориентированы преимущественно на замкнутые системы типа «человек-машина», оказываются недостаточными для адекватного описания данного процесса. Они, как правило, не учитывают логистику как равноправный элемент управления

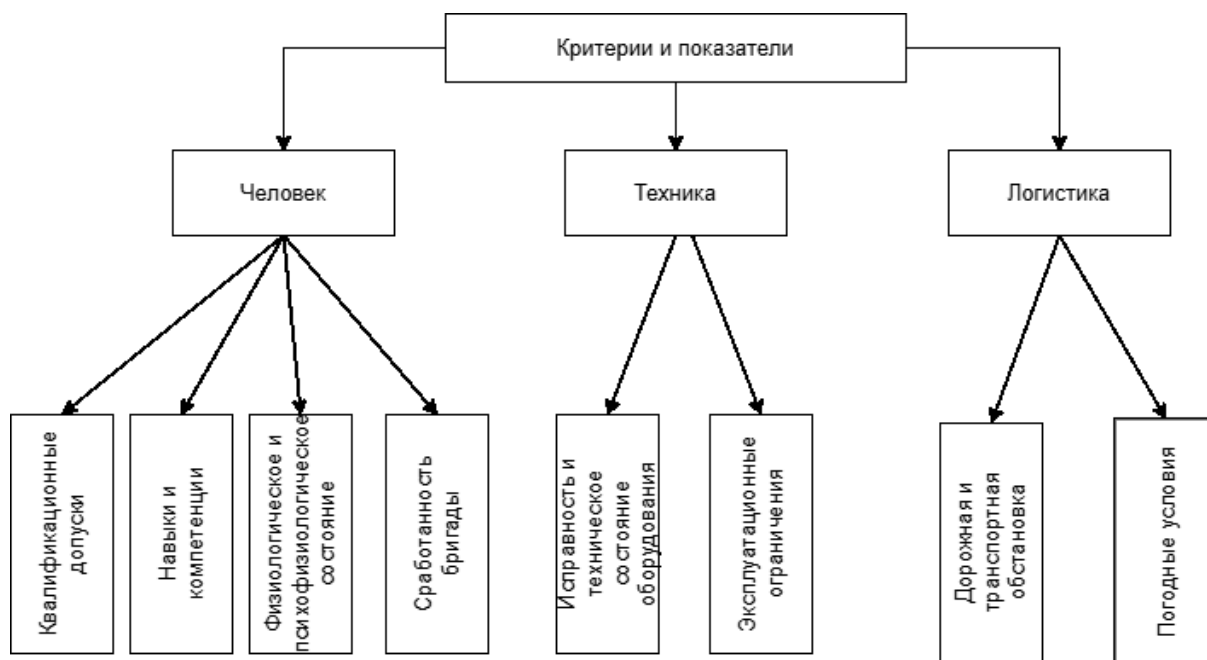
и не позволяют формализовать состояние ремонтной бригады как комплексной человеко-техническо-логистической системы.

Таким образом, процесс управления аварийно-восстановительными бригадами обладает всеми базовыми признаками эргатической системы (наличие человека в контуре управления, участие техники, неопределённость, адаптивность, стохастичность), и при этом, существующий научно-методический аппарат эргатического моделирования не обеспечивает достаточной полноты описания данного процесса.

Отмеченное ограничение имеет системный (организационно-технический) характер. В рамках оперативных задач, возлагаемых на ОВБ, управляемый объект не сводится к классической эргатической системе, а представляет собой многофакторный комплекс ресурсов, эффективность функционирования которого обеспечивается одновременным выполнением трех категорий требований: допуск и возможность выполнения работ по компетенциям и нормативами (человеческий фактор), наличие и готовность необходимых технических средств (технический фактор), достижимость места аварии и выполнение работ в нормативное время с учётом внешних ограничений (логистический фактор). В реальной практике невыполнение хотя бы одного из указанных условий приводит к срыву восстановительных мероприятий.

В связи с этим отбор и систематизация параметров, характеризующих готовность оперативно-выездной бригады, целесообразно осуществлять не по перечню разрозненных наблюдаемых признаков, а через декомпозицию объекта управления на функционально необходимые подсистемы. Такой подход обеспечивает: полноту покрытия факторов, определяющих возможность ликвидации аварии в заданные сроки, сопоставимость разнородных данных из различных источников за счёт их привязки к устойчивым подсистемам.

Проведенный анализ показал, что в качестве показателей целесообразно применять следующие три категории Человек [1; 3; 25; 27], Техника [21; 5], Логистика [2; 5; 7; 18], представленные на рисунке 2.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2 – Критерии и параметры, влияющие на выбор бригады для ликвидации аварии по категориям «Человек – Техника – Логистика»

Для количественного описания состояния каждой из подсистем управления вводятся частные показатели оперативной готовности: $H_{b,i}(t)$ – показатель подсистемы «Человек», $E_{b,i}(t)$ – показатель подсистемы «Техника», $L_{b,i}(t)$ – показатель подсистемы «Логистика».

Краткая характеристика подсистем представлена ниже.

Частный показатель «Человек» описывает состав бригады, уровень компетенций каждого специалиста, наличие действующих допусков под конкретный тип работ, опыт решения аварий того же класса, степень усталости (сколько часов смены уже отработано), а также сработанность состава (насколько люди привыкли работать именно друг с другом).

Частный показатель «Техника» отражает укомплектованность и доступность технических средств: наличие требуемого инструмента и материалов для конкретного типа повреждения, работоспособность и доступность специализированного транспорта, а также состояние и готовность техники к выезду.

Частный показатель «Логистика» включает достижимость аварийной точки во времени согласно нормативам. Подсистема включает в себя: расчётную оценку

времени прибытия с учётом дорожной обстановки, погодных ограничений, недоступности участков дорожной сети, регламентов.

Проведенный анализ показал, что подсистемы формируют ограничения и условия принятия управленческих решений при назначении оперативно-выездных бригад, что в свою очередь обуславливает необходимость формализованного описания в рамках динамической модели управления и соответственно определяет задачи динамической модели процесса управления оперативно-выездными бригадами при проведении аварийно-восстановительных работ, в том числе:

- определение и формализация зависимости частных показателей эффективности подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика» от параметров, поступающих из разнородных информационных источников;
- получение аналитической зависимости изменения частных показателей от параметров аварийной обстановки, инфраструктурных ограничений и внешних факторов, в том числе с учётом их взаимного влияния и динамического изменения во времени;
- получение аналитической зависимости условий допуска оперативно-выездных бригад к выполнению аварийно-восстановительных работ от значений частных показателей подсистем для разработки методики нахождения критических порогов, допустимых областей функционирования оперативно-выездных бригад;
- оценка степени влияния отдельных человеческих, технических и логистических факторов на итоговое состояние бригады и выявление некомпенсируемых характеристик, определяющих возможность допуска к выполнению работ;
- по результатам определенных зависимостей определение и формирование комплексного показателя эффективности процесса управления.

Выполнение указанных требований определяет состав и структуру модели управления оперативно-выездными бригадами как трехмерной динамической модели эргатической системы «Человек–Техника–Логистика», в которой

ремонтная бригада представляется единым объектом, состояние которого в момент времени t описывается вектором в трехмерном пространстве параметров, а каждая координата этого вектора является нормированной мерой готовности соответствующей подсистемы.

2.2 Пространство состояний и условия применимости динамической модели управления оперативно-выездными бригадами

Сформулированные требования определяют необходимость представления ОВБ как единого объекта управления в трёхмерном пространстве «Человек–Техника–Логистика» и задают состав функций, которые должна реализовывать динамическая модель. В параграфе 1.4 модель управления оперативно-выездными бригадами была представлена в общем виде алгебраической системой M и были введены основные определения. Дальнейшее построение модели требует формального задания пространства состояний, допущений о динамике частных показателей и способа согласования разнородных данных во времени.

Для построения динамической модели принимаются следующие исходные положения: состояние оперативно-выездной бригады описывается тремя нормированными частными показателями, исходные данные поступают асинхронно и требуют согласования во времени, принимаемое управленческое решение зависит не только от факта доступности бригады, но и от её текущей способности выполнить работы по конкретному инциденту.

Процесс принятия управленческих решений при назначении оперативно-выездных бригад рассматривается как отображение, сопоставляющее каждой паре «бригада – инцидент» текущее состояние системы в пространстве частных показателей в момент времени t по выражению (8)

$$B_t \rightarrow I_t, \quad (8)$$

где B_t – множество бригад в момент времени t ;
 I_t – множество инцидентов в момент времени t .

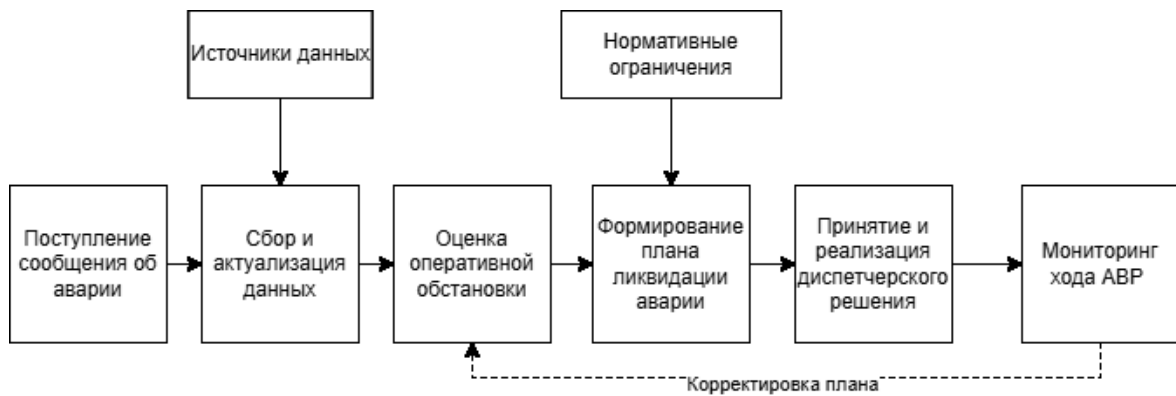
Такая формализация позволяет учесть зависимость принимаемых решений от состояния объекта управления и динамики внешних условий и определяет основные задачи и требования к модели управления ОВБ, что соответственно потребует построение динамической модели управления ОВБ, в рамках которой процесс принятия решений описывается с учётом изменения состояния системы во времени, а диспетчер сохраняется как активный элемент в контуре управления.

Кроме того, при оценке процесса управления следует учитывать, что источники данных о состоянии объекта управления принадлежат различным классам информационных систем, о которых упоминалось ранее и проблеме их обновления и синхронизации исследованной в главе 1.

Следовательно, процесс принятия решений по формированию и назначению оперативно-выездной бригады не может быть адекватно описан в рамках статической модели, предполагающей неизменность параметров во времени. В этих условиях модель, не учитывающая временную изменчивость параметров и асинхронность информационных потоков, неизбежно приводит к искажению оценки готовности бригады и снижению точности и оперативности принимаемых решений. Для корректного описания процесса управления аварийно-восстановительными работами требуется модель, явно учитывающая динамику состояния системы во времени.

На практике процесс ликвидации аварии развивается по стадиям: анализ доступных источников данных, степень их достоверности и состав ограничений, а также характер управляющих воздействий диспетчера. В этой связи процесс управления аварийно-восстановительными работами целесообразно представлять в виде последовательности взаимосвязанных этапов, представленных на рисунке 3.

На первом этапе осуществляется фиксация факта аварии и первичная локализация повреждённого участка сети.



Источник: составлено автором.

Рисунок 3 – Концептуальная схема процесса управления ОВБ

Далее происходит расширение информационного контекста за счёт поступления данных о составе и функциональном состоянии персонала, наличии и готовности технических средств, а также текущей логистической обстановке.

Этап формирования плана аварии характеризуется уточнением параметров аварии, корректировкой маршрутов следования и окончательным выбором бригад, допущенных к выполнению аварийно-восстановительных работ.

Последний этап соответствует непосредственному выполнению аварийно-восстановительных работ и сопровождается непрерывным мониторингом информации о состоянии бригад и внешних условиях.

Указанное представление процесса управления оперативно-выездными бригадами представляет собой динамический этапный процесс и определяет требование к модели об изменениях частных показателей от параметров аварийной обстановки, инфраструктурных ограничений и внешних факторов, в том числе с учётом их взаимного влияния и динамического изменения во времени, в котором состояние системы непрерывно изменяется, а решения принимаются на основе информации различной полноты и достоверности.

С учётом изложенного, в настоящей работе предлагается единая динамическая модель управления оперативно-выездными бригадами, включающая частные подсистемы, соответствующие различным этапам процесса аварийно-восстановительных работ. При этом динамика

состояния оперативно-выездной бригады должна быть представлена единым пространством состояний, а различия между этапами учитываются через корректировку входных данных, параметров модели и управляющих воздействий.

Для формального учёта асинхронности поступления информации введем формальное описание исходных данных. Пусть набор исходных данных задан как множество, по формуле (9)

$$Z = \{Z_1, Z_2 \dots, Z_n\}, \quad (9)$$

где Z – множество исходных данных, таблиц;

N – количество таблиц БД, $N = 1 \dots n$.

Каждая запись $z \in Z_n$, представляется кортежем (10)

$$z = (s_z, k_z, x_{z,a}, t^{obs}(z), t_z^{reg}, t_z^{from}, t_z^{to}), \quad (10)$$

где s_z – источник записи;

k_z – простой или составной ключ;

$v_{z,a}$ – значение атрибута записи;

t_z^{obs} – время возникновения события или наблюдения;

t_z^{reg} – момент регистрации записи в БД;

t_z^{from}, t_z^{to} – начало и окончание периода действия записи.

Схема таблицы Z_n задаётся множеством её атрибутов, задаваемых выражением (11)

$$Atr_n = \{a_{n,1}, a_{n,2}, \dots, a_{n,p_s}\}, \quad (11)$$

где Atr_n – множество атрибутов таблицы Z_n ;

$a_{n,j}$ – j -й атрибут таблицы;

p_s – количество атрибутов в таблице Z_n .

Множество всех атрибутов разделяется на количественные и текстовые или категориальные по формуле (12)

$$Atr = Atr^{num} \cup Atr^{text}, \quad (12)$$

где Atr – множество всех атрибутов;

Atr^{num} – множество количественных атрибутов;

Atr^{text} – множество текстовых или качественных атрибутов.

Временная корректность исходных данных обеспечивается отбором записей, возникших, зарегистрированных и действующих к моменту принятия решения; множество таких записей определяется условием (13)

$$Z_n^{adm}(t) = \{z \in Z_n \mid t_z^{obs} \leq t, t_z^{reg} \leq t, t_z^{from} \leq t < t_z^{to}\}, \quad (13)$$

где $Z_n^{adm}(t)$ – множество допустимых записей таблицы Z_n .

Условие гарантирует, что при расчёте показателей не используется информация, которая стала доступна системе после момента принятия решения t .

Содержательно пространство состояний задаётся как декартово произведение трёх шкал частных показателей по формуле (14)

$$S = S_H \times S_E \times S_L, \quad (14)$$

где S_H – шкала значений частного показателя подсистемы «Человек»;

S_E – шкала значений частного показателя подсистемы «Техника»;

S_L – шкала значений частного показателя подсистемы «Логистика».

Поскольку все частные показатели нормируются, пространство состояний имеет вид (14). Каждое состояние из S отражает текущую ситуацию с персоналом, техническим оснащением и логистическими условиями назначения бригады на конкретный инцидент. Переходы между состояниями определяются изменением входных данных, деструктивных факторов $D(t)$, управляющих воздействий $U(t)$, а также отношениями допустимости, входящими в множество ограничений Ξ .

Для каждого инцидента область допустимых состояний задаётся пороговыми ограничениями на значения частных показателей в соответствии с выражением (15)

$$S_i^{adm}(t) = \{s_{b,i}(t): H_{b,i}(t) \geq H_i^{min}, E_{b,i}(t) \geq E_i^{min}, L_{b,i}(t) \geq L_i^{min}\}, \quad (15)$$

где $S_i^{adm}(t)$ – область допустимых состояний;

$s_{b,i}(t)$ – вектор состояния оперативно-выездной бригады в момент t ;

$H_i^{min}, E_i^{min}, L_i^{min}$ – ограничения для инцидента по подсистемам.

Множество бригад, допустимых для назначения на конкретный инцидент, формируется путём отбора бригад, вектор состояния которых принадлежит области допустимых состояний, по формуле (16)

$$B_i^{adm}(t) = \{b \in B(t) \mid s_{b,i}(t) \in S_i^{adm}(t)\} = \{b \in B(t) \mid H_{b,i}(t) \geq H_i^{min}, E_{b,i}(t) \geq E_i^{min}, L_{b,i}(t) \geq L_i^{min}\}, \quad (16)$$

где $S_i^{adm}(t)$ – область допустимых состояний;

$s_{b,i}(t)$ – вектор состояния оперативно-выездной бригады в момент t .

Область допустимых состояний S , введённая в параграфе 1.4, в настоящем разделе рассматривается как часть пространства состояний, для которой выполняются отношения и ограничения Ξ . На основе $S_i^{adm}(t)$ для каждого

инцидента может быть сформировано множество допустимых альтернатив назначения.

Определим допущения модели:

1) Любое состояние бригады в реальном процессе управления полностью определяется тремя группами факторов (кадровые, технические, логистические), что соответствует трёхмерному вектору (1).

2) Любое управленческое решение изменяет одну или несколько координат вектора $s_{b,i}(t)$.

3) Все ограничения процесса управления могут быть формализованы как отношения из множества Ξ , определяющие, какие состояния и переходы допустимы.

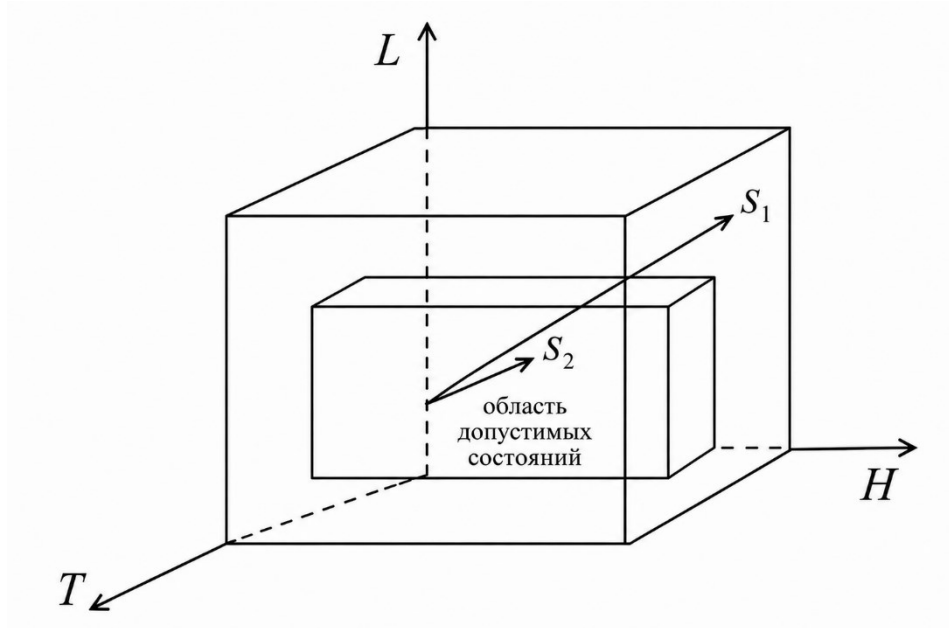
Введённые ограничения задают границы корректного применения модели в условиях диспетчерского управления. Модель применима в тех случаях, когда состояние оперативно-выездной бригады может быть представлено через согласованные частные показатели подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика», а принимаемое решение зависит не только от факта доступности бригады, но и от её текущей способности выполнить работы по конкретному инциденту в заданный момент времени. При этом ограничения кадрового, технического, логистического и регламентного характера выступают не внешними исключениями из модели, а элементами формального описания допустимых состояний и переходов между ними.

Стоит отметить, что частные показатели подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика» характеризуются различной природой, масштабом изменения и динамикой, а также по-разному реагируют на деструктивные факторы, обусловленные неполнотой, рассинхронизацией и семантической неоднородностью данных. В отсутствие единого показателя, согласующего эти различия, процесс принятия решений неизбежно возвращается к эвристическим правилам и субъективным оценкам, что противоречит целям формализации и снижает воспроизводимость результатов управления.

2.3 Формализация комплексного показателя оперативной готовности бригады b для инцидента i в момент времени t

Как было показано в разделе 2.1, состояние оперативно-выездной бригады b при ликвидации инцидента i в момент времени t описывается вектором частных показателей подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика» (1), формируемых на основе согласованного пространства признаков (35).

Пример пространственного отображения вектора приведен на рисунке 4.



Источник: составлено автором.

Рисунок 4 – Пример вектора состояния ОВБ в момент t_0

Введённый вектор состояния ОВБ является многомерным и не может напрямую использоваться диспетчером для оперативного сравнения альтернатив.

В этой связи необходима разработка и применение комплексного показателя оперативной готовности бригады, обеспечивающего переход от многомерного описания состояния бригады к одномерной шкале управленческих предпочтений. Указанное требование обеспечивается тем, что такой показатель оперативной готовности бригады b для инцидента i в момент времени t определяется как функция согласования частных показателей подсистем по формуле (5).

На основании теории агрегирующих функций и рекомендаций по построению композитных индексов для комплексного показателя оперативной готовности выделяются три требования [45; 55; 101; 122]:

1) **Монотонность:** увеличение любого частного показателя при неизменных значениях остальных не должно уменьшать комплексный показатель.

2) **Некомпенсаторность критических факторов:** критически низкое значение одной компоненты не должно компенсироваться высокими значениями других компонент.

3) **Интерпретируемость:** способ агрегирования должен быть прозрачным и позволять установить влияние частных показателей и их весов на итоговую оценку.

В качестве функции агрегации выбрана взвешенная мультипликативная функция, поскольку она удовлетворяет сформулированным требованиям, задаваемой формулой (17)

$$\Phi\left(H_{b,i}(t), E_{b,i}(t), L_{b,i}(t)\right) = H_{b,i}(t)^{\alpha_H} E_{b,i}(t)^{\alpha_E} L_{b,i}(t)^{\alpha_L}, \quad (17)$$

$$\alpha_H, \alpha_E, \alpha_L > 0, \quad \alpha_H + \alpha_E + \alpha_L = 1.$$

Во-первых, при положительных весах функция монотонно возрастает по каждому аргументу, что соответствует принятому в теории агрегирования требованию неубывания по каждой переменной; геометрическое среднее рассматривается как агрегирующая функция на неотрицательной области [101].

Во-вторых, мультипликативная агрегация снижает возможность взаимной компенсации частных показателей по сравнению с аддитивным агрегированием [122]. Однако она обеспечивает только частичную некомпенсаторность.

В-третьих, при $H, E, L > 0$ функция имеет аддитивное представление в логарифмической шкале по формуле (18)

$$\ln \Phi \left(H_{b,i}(t), E_{b,i}(t), L_{b,i}(t) \right) = \alpha_H \ln H_{b,i}(t) + \alpha_E \ln E_{b,i}(t) + \alpha_L \ln L_{b,i}(t). \quad (18)$$

Слагаемые правой части отдельно характеризуют вклады подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика». Такая декомпозиция соответствует требованию прозрачности и возможности разложения композитного индекса на исходные составляющие [45; 122].

Тогда итоговое представление комплексного показателя оперативной готовности с учетом выбранной функции агрегации и учета некомпенсаторности задается формулой (19)

$$G_{b,i}(t) = \begin{cases} H_{b,i}(t)^{\alpha_H} E_{b,i}(t)^{\alpha_E} L_{b,i}(t)^{\alpha_L}, & s_{b,i}(t) \in S_i^{adm} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (19)$$

где $s_{b,i}(t)$ – вектор состояния оперативно-выездной бригады в момент t ;
 S_i^{adm} – область допустимых состояний.

В связи с тем, что состояние оперативно-выездной бригады не является статическим. Оно изменяется во времени под воздействием как внешних деструктивных факторов, так и внутренних процессов. Такая постановка соответствует классу линейных дифференциальных уравнений первого порядка с затуханием, управляющим воздействием и возмущением [31; 82]. Динамика частных показателей подсистем под воздействием естественной деградации, управления и деструктивных факторов задаётся системой линейных дифференциальных уравнений (20)

$$F_{b,i} \left(t, s_{b,i}(t), u_{b,i}(t), d_{b,i}(t) \right) = \begin{cases} \dot{H}_{b,i}(t) = -\lambda_H H_{b,i}(t) + u_{b,i}^H(t) - d_{b,i}^H(t) \\ \dot{E}_{b,i}(t) = -\lambda_E E_{b,i}(t) + u_{b,i}^E(t) - d_{b,i}^E(t) \\ \dot{L}_{b,i}(t) = -\lambda_L L_{b,i}(t) + u_{b,i}^L(t) - d_{b,i}^L(t) \end{cases}, \quad (20)$$

где $\lambda_H, \lambda_E, \lambda_L \geq 0$ – коэффициенты естественной деградации соответствующих показателей;

$u_{b,i}^H(t), u_{b,i}^E(t), u_{b,i}^L(t) \geq 0$ – управляющие воздействия, направленные на повышение готовности бригады;

$d_{b,i}^H(t), d_{b,i}^E(t), d_{b,i}^L(t) \geq 0$ – деструктивные воздействия, снижающие готовность бригады.

В рамках разработанной модели управляющие и деструктивные воздействия рассматриваются как заданные для конкретного анализируемого варианта управленческого решения. Система (20) задаёт локальную динамику изменения показателей, тогда как соблюдение границ пространства состояний обеспечивается на уровне численной реализации посредством компонентной проекции после очередного шага интегрирования. Такой подход позволяет сохранить простую интерпретируемую форму модели и одновременно обеспечить выполнение физических ограничений нормированных состояний.

На интервалах времени, на которых траектория находится внутри допустимой области и значения всех частных показателей положительны, функция (17) является дифференцируемой, а пороговый признак допустимости (18) остаётся постоянным. Поэтому темп изменения комплексного показателя на таком интервале определяется дифференцированием функции по формуле (21)

$$\frac{\dot{G}_{b,i}(t)}{G_{b,i}(t)} = \alpha_H \frac{\dot{H}_{b,i}(t)}{H_{b,i}(t)} + \alpha_E \frac{\dot{E}_{b,i}(t)}{E_{b,i}(t)} + \alpha_L \frac{\dot{L}_{b,i}(t)}{L_{b,i}(t)}. \quad (21)$$

После подстановки уравнений динамики частных показателей в соотношение (21) производная комплексного показателя принимает вид, представленный формулой (22)

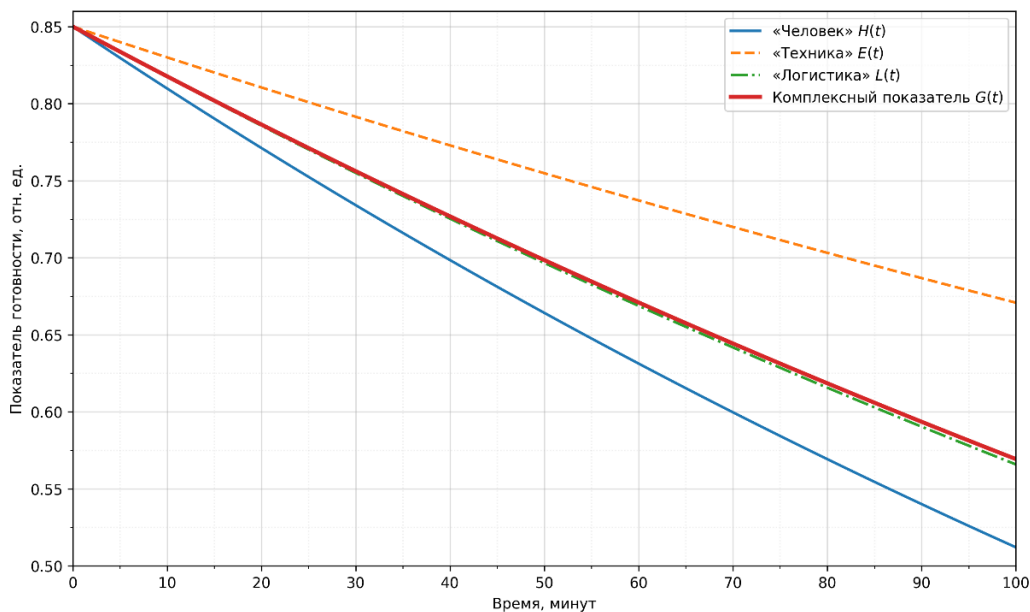
$$\begin{aligned} \dot{G}_{b,i}(t) = G_{b,i}(t) \left[\alpha_H \left(-\lambda_H + \frac{u_{b,i}^H(t) - d_{b,i}^H(t)}{H_{b,i}(t)} \right) + \alpha_E \left(-\lambda_E + \frac{u_{b,i}^E(t) - d_{b,i}^E(t)}{E_{b,i}(t)} \right) + \right. \\ \left. + \alpha_L \left(-\lambda_L + \frac{u_{b,i}^L(t) - d_{b,i}^L(t)}{L_{b,i}(t)} \right) \right], \end{aligned} \quad (22)$$

где $\dot{G}_{b,i}(t)$ – абсолютная скорость изменения комплексного показателя готовности бригады;

$$H_{b,i}(t), E_{b,i}(t), L_{b,i}(t) > 0.$$

Рассмотрим для иллюстрации пример расчета показателя комплексной готовности бригад с учетом и без учета управления и воздействий. Для расчета комплексной готовности бригад была разработана программа в операционной системе Python с использованием метода решения дифференциальных уравнений метода Рунге-Куты 4 порядка. Коэффициенты соответственно были равны $\alpha_H = 0,45; \alpha_E = 0,3; \alpha_L = 0,25$, $\lambda_H = 0,05; \lambda_E = 0,03; \lambda_L = 0,04$. Начальные условия были равны $H_0 = 0,85; E_0 = 0,85; L_0 = 0,85$.

На рисунке 5 представлена зависимость показателя комплексной готовности бригады $G_{b,i}(t)$ с учетом постоянных управления и деструктивных воздействий.



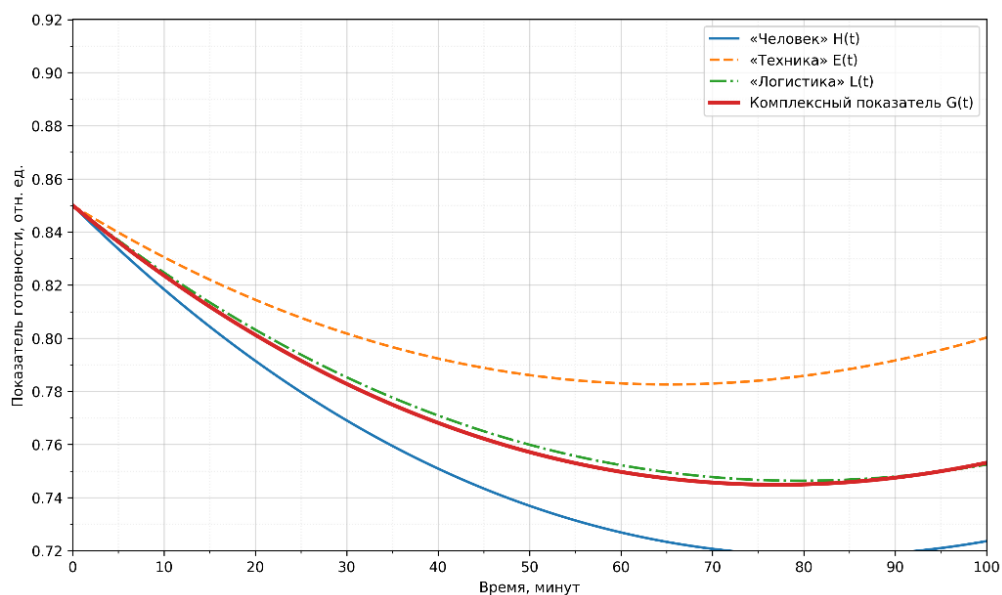
Источник: составлено автором.

Рисунок 5 – Показатель готовности бригады с постоянными управляющими воздействиями и деструктивными факторами

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 5, показывает, что при постоянных управляющих и деструктивных воздействиях изменение частных показателей готовности носит монотонный характер, однако интенсивность их снижения различается.

На временном интервале 100 мин показатель подсистемы «Человек» уменьшается с 0,85 до 0,512, показатель подсистемы «Техника» до 0,671, а показатель подсистемы «Логистика» до 0,566. Различие траекторий обусловлено различными значениями коэффициентов естественной деградации и соотношением управляющих и деструктивных воздействий для каждой подсистемы.

На рисунке 6 представлен более сложный сценарий, в котором интенсивность управляющих и деструктивных воздействий изменяется линейно во времени. В отличие от случая постоянных воздействий, траектории частных показателей имеют немонотонный характер.



Источник: составлено автором.

Рисунок 6 – Показатель готовности бригады с линейными управляющими воздействиями и деструктивными факторами

На начальном участке временного интервала действие управления еще недостаточно для компенсации естественной деградации состояния, вследствие чего значения, и уменьшаются. По мере увеличения интенсивности управляющего воздействия темп снижения показателей сокращается,

после чего достигаются минимальные значения и происходит изменение направления их динамики.

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 6, показывает, что при линейном изменении управляющих и деструктивных воздействий динамика показателей готовности приобретает немонотонный характер. На начальном участке преобладает действие естественной деградации и деструктивных факторов, поэтому значения частных показателей уменьшаются. По мере увеличения управляющего воздействия скорость снижения уменьшается, достигается минимальное значение, после чего направление изменения показателей может измениться. Такое поведение необходимо учитывать при прогнозировании состояния ОВБ в условиях изменяющихся во времени управляющих и деструктивных воздействий.

При линейно возрастающих во времени управляющих воздействиях и деструктивных факторах траектории частных показателей и комплексного показателя готовности становятся более сложными. Это связано с тем, что изменение состояния бригады определяется уже не только текущими значениями частных показателей, но и темпами изменения управлений $u_H(t)$, $u_E(t)$, $u_L(t)$, деструктивных воздействий $d_H(t)$, $d_E(t)$, $d_L(t)$, а также коэффициентами естественной деградации соответствующих подсистем. Следовательно, при нарастании внешних неблагоприятных факторов выбор управленческой альтернативы, определяющей соответствующий набор управляющих воздействий, должен выполняться с учётом её влияния на все частные показатели и итоговое значение комплексной готовности ОВБ.

Полученные зависимости показывают, что комплексный показатель готовности является не только интегральной характеристикой текущего состояния бригады, но и формальным критерием сравнения альтернативных вариантов назначения. Если для каждой пары «бригада – инцидент» рассчитано значение $G_{b,i}(t)$, то задача диспетчерского управления может быть сведена к выбору такой допустимой бригады, для которой комплексный показатель оперативной готовности максимален при выполнении заданных ограничений по составу, оснащению, маршруту и времени реагирования.

На основании сделанных выводов сформулируем задачу управления оперативно-выездными бригадами, как оптимизационную задачу.

Для одного инцидента оптимальная ОВБ выбирается из множества допустимых альтернатив по максимальному значению комплексного показателя оперативной готовности согласно формуле (23)

$$b_i^*(t) = \arg \max_{b \in B_i^{adm}(t)} G_{b,i}(t), \quad (23)$$

где b_i^* – оптимальная бригада для одного инцидента i в момент t ;

$G_{b,i}(t)$ – комплексный показатель готовности бригады, определяется по формуле (19);

$B_i^{adm}(t)$ – множество допустимых бригад (16).

При одновременном распределении нескольких ОВБ по инцидентам отдельные назначения рассматриваются совместно. Обозначим через множество $\Pi(t)$ допустимых вариантов распределения бригад по инцидентам в момент времени t . Для каждого варианта $\pi \in \Pi(t)$ через $\pi(i)$ обозначается бригада, назначаемая на инцидент i . Тогда оптимальное распределение определяется максимизацией суммарного комплексного показателя оперативной готовности по формуле (24)

$$\pi^*(t) = \arg \max_{\pi \in \Pi(t)} \sum_{i \in I_t} G_{\pi(i),i}(t), \quad (24)$$

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 (17).

Выражения (23) и (24) задают общий критерий оптимальности управленческого решения. При последующей реализации численного метода текущее значение в данном критерии заменяется его прогнозным значением, полученным в результате численного решения системы (20). Следовательно, оптимальным считается допустимое назначение, обеспечивающее максимальное суммарное прогнозное значение комплексного показателя оперативной готовности.

2.4 Обоснование структуры модели

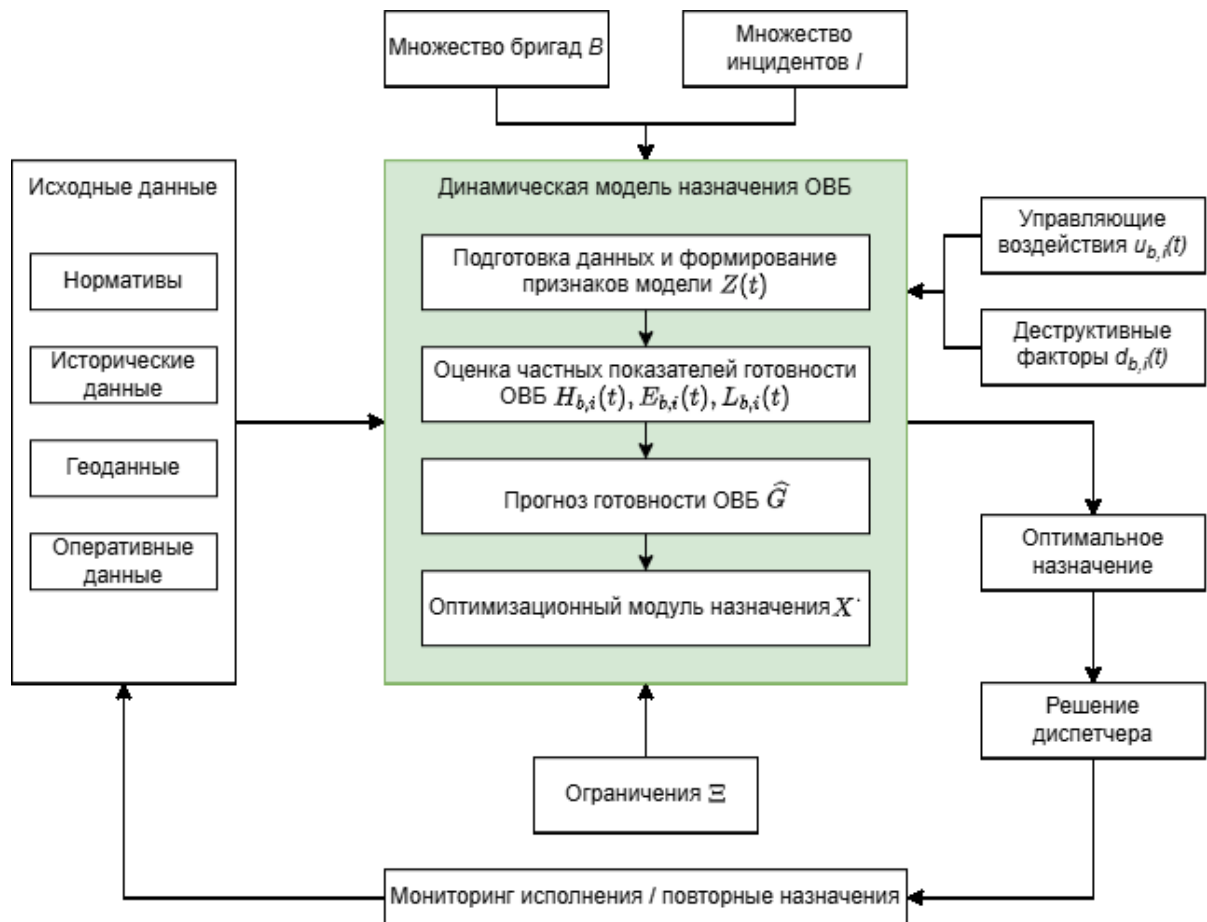
В параграфах 2.1-2.3 были определены требования к динамической модели управления оперативно-выездными бригадами, уточнено пространство состояний пары «бригада – инцидент» и формализован комплексный показатель оперативной готовности бригады. На основании полученных результатов необходимо определить структуру модели, обеспечивающую последовательный переход от разнородных исходных данных к управленческому решению диспетчера.

В соответствии с постановкой задачи, приведённой в разделе 1.4, модель управления оперативно-выездными бригадами рассматривается как алгебраическая система M , включающая исходные данные, пространство состояний, управляющие воздействия, деструктивные факторы, операторы преобразования данных, отношения допустимости, функцию агрегации и целевой функционал.

Структура динамической модели управления оперативно-выездными бригадами при проведении аварийно-восстановительных работ предложенная в работе представлена на рисунке 7.

Первый функциональный блок модели предназначен для согласования и унификации исходных данных. В данном блоке учитываются неполнота, асинхронность и семантическая неоднородность информации. Тем самым обеспечивается переход от множества разрозненных наблюдений к согласованному информационному слою данных.

Второй функциональный блок предназначен для расчёта частных показателей подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика». Результатом работы данного блока является формирование ранее введённого вектора состояния $s_{b,i}(t)$ который является единым формальным описанием состояния бригады применительно к конкретному инциденту.



Источник: составлено автором.

Рисунок 7 – Структура комплексной динамической модели управления ОВБ

Третий функциональный блок выполняет проверку допустимости состояния и назначения. Данный блок связан с множеством отношений и ограничений, введённым в постановке задачи.

Четвёртый функциональный блок предназначен для расчёта комплексного показателя оперативной готовности $G_{b,i}(t)$ для количественной оценки предпочтительности допустимых альтернатив.

Пятый функциональный блок отвечает за поддержку принятия управленческого решения диспетчера. На его вход поступают допустимые

альтернативы назначения и значения комплексного показателя оперативной готовности. На выходе формируется управленческое решение, включающее выбор оперативно-выездной бригады.

Отдельным элементом структуры является блок обратной связи. Его наличие обусловлено динамическим характером аварийно-восстановительных работ. После принятия решения и по мере поступления новой информации изменяются состояние бригад, дорожная обстановка, параметры инцидента, доступность техники и состав ограничений. Поэтому структура модели должна обеспечивать повторный пересчёт согласованного информационного слоя, вектора состояния, комплексного показателя и управленческого решения.

Такая структура модели определяет общие функциональные подсистемы, состояние которых формирует оперативную готовность ремонтной бригады.

Выводы к главе 2

Разработана динамическая эргатическая модель процесса управления ОВБ электросетевой компании при проведении АВР, отличающаяся от известных подходов представлением ремонтной бригады как целостной человеко-техническо-логистической системы, в которой состояние бригады формализовано в виде частных показателей подсистем «Человек», «Техника», «Логистика», динамически изменяющихся во времени под воздействием управляющих и деструктивных факторов.

Обоснована и формализована структура модели, обеспечивающая последовательный переход от разнородных, асинхронно поступающих и семантически неоднородных данных к согласованному пространству признаков, а после к частным показателям подсистем и, в конечном итоге, к комплексной оценке оперативной готовности бригады.

Разработан комплексный показатель готовности оперативно-выездной бригады, определяемый как функция согласования частных показателей подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика». Показатель обеспечивает переход

от многомерного описания состояния бригады к одномерной шкале управленческих предпочтений, используемой диспетчером при принятии решений.

Формализована динамика изменения состояния оперативно-выездной бригады, отражающая изменения частных показателей подсистем во времени с учётом внешних возмущений, управляющих воздействий и деструктивных факторов информационного характера. Полученная формализация позволяет анализировать темп изменения оперативной готовности и вклад каждой подсистемы в итоговую оценку.

Глава 3

Численный метод решения задачи управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании на основе комплексного показателя оперативной готовности

Разработанная во второй главе динамическая модель процесса управления аварийно-восстановительными работами электросетевой компании рассматривает процесс формирования и корректировки параметров оперативно-выездных бригад как процесс, управляемый во времени, состояние которого определяется совокупностью параметров подсистем «Человек», «Техника», «Логистика», а также характеристиками аварийной ситуации и моментом принятия управленческого решения.

В рамках численного метода формируется множество реализуемых конфигураций ОВБ путем перебора фактически доступных в депо готовых составов бригад и вариантов технического оснащения. Эффективность допустимых конфигураций оценивается на основе текущих и прогнозных значений комплексного динамического показателя оперативной готовности ОВБ. Указанный показатель характеризует степень соответствия человеческих, технических и логистических ресурсов бригады требованиям конкретной аварийной ситуации и используется для контроля достижения заданной оперативности восстановления электроснабжения во времени.

Поскольку процесс формирования и корректировки параметров оперативно-выездных бригад относится к классу задач принятия управленческих решений в условиях неопределённости и ограниченности информации, точность и достоверность текущих оценок состояния подсистем «Человек», «Техника», «Логистика» непосредственно определяют обоснованность и оперативность принимаемых диспетчером решений. Искажения, запаздывание или неоднозначная интерпретация исходных данных приводят к снижению корректности оценки параметров бригады и, как следствие, к увеличению времени реакции системы

управления и риску выбора неэффективного состава, оснащения или маршрута следования при ликвидации аварийной ситуации.

В связи с этим указанный процесс характеризуется следующими особенностями:

- большим количеством исходных данных;
- нечеткостью представления исходной информации;
- значительным множеством возможных решений;
- сложностью математического представления целевой функции;
- необходимостью оперативного назначения в зависимости

от изменяющихся условий и исходных данных.

Глава посвящена разработке численного метода и его операций, обеспечивающих получение сопоставимых и интерпретируемых оценок подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика», прогноза комплексного показателя оперативной готовности ОВБ и выбор оптимального назначения ОВБ на ликвидацию инцидента.

3.1 Состав численного метода управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании

Разработанная во второй главе динамическая эргатическая модель процесса управления ОВБ при проведении АВР позволила получить формализованную зависимость комплексного показателя оперативной готовности ОВБ от совокупности факторов, характеризующих состояние подсистем «Человек», «Техника», «Логистика», а также от параметров аварийной ситуации и момента времени принятия управленческого решения.

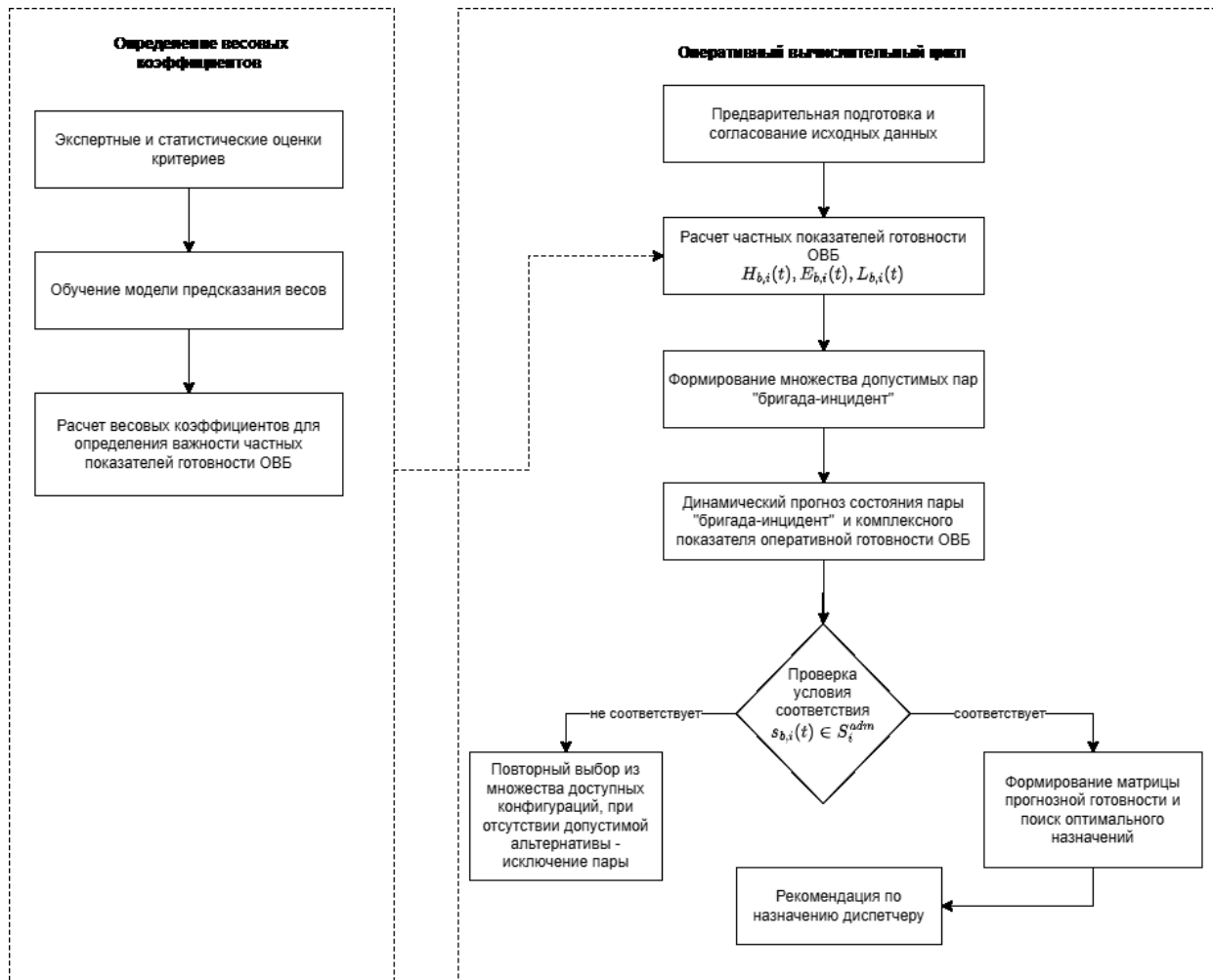
Анализ полученных зависимостей показал, что для корректного расчёта комплексного показателя оперативной готовности бригады и его применения в задачах управления необходима разработка численного метода, регламентирующего подготовку исходных данных и вычислительные процедуры в условиях их неполноты, асинхронности во времени и семантической неоднородности данных.

Для достижения цели диссертации численный метод управления ОВБ должен обеспечить решение следующих взаимосвязанных задач:

- сформировать согласованное во времени и по семантике признаков описание состояния оперативно-выездной бригады и условий ликвидации аварии, при котором каждому моменту принятия управленческого решения сопоставляется совокупность параметров, доступных системе управления на данный момент и интерпретируемых в едином понятийном пространстве;
- рассчитать частные показатели подсистем «Человек», «Техника», «Логистика» на основе сформированного согласованного во времени и по семантике признаков описания состояния оперативно-выездной бригады;
- определить относительную частных показателей по результатам статистической обработки экспертных оценок и аппроксимации;
- сформировать допустимые пары «бригада – инцидент» на основании существующих конфигураций, выполнить численный прогноз комплексной готовности ОВБ и выбрать оптимальное назначение бригады на инцидент.

В данной работе под численным методом понимается упорядоченная совокупность взаимосвязанных вычислительных процедур преобразования исходных данных, расчёта и прогноза состояния динамической системы и оптимизации назначения ОВБ, в соответствии с общим представлением численного метода как алгоритмически организованной последовательности вычислительных операций решения математической задачи [41; 42; 43; 44]. Состав и взаимосвязь основных этапов численного метода представлены на рисунке 8.

Представленная схема отражает переход от исходных разнородных потоков данных к вычислению частных показателей подсистем «Человек», «Техника», «Логистика», формированию допустимых пар «бригада – авария», численному прогнозированию комплексной готовности и оптимальному назначению ОВБ. Блок определения весовых коэффициентов является калибровочным: модель весов обучается предварительно на наборе размеченных оценок, а в численном методе используются рассчитанные параметры модели.



Источник: составлено автором.

Рисунок 8 – Структурно-логическая схема численного метода управления оперативно-выездными бригадами

В состав численного метода входят следующие взаимосвязанные процедуры:

- предварительная подготовка исходных данных, включающая временную синхронизацию и семантическую унификацию;
- вычисление частных показателей для подсистем $H_{b,i}(t), E_{b,i}(t), L_{b,i}(t)$ с использованием нормировки и агрегирования факторов;
- автоматическое определение весовых коэффициентов, учитывающее различную природу факторов и их критичность для выполнения аварийно-восстановительных работ;
- численное прогнозирование динамики готовности бригады в рамках пары (бригада-инцидент) и решение задачи о назначениях по прогнозному комплексному показателю.

3.2 Формирование пространства признаков динамической модели управления оперативно-выездными бригадами

Для решения задачи формирования временно и семантически согласованного пространства признаков динамической модели управления ОВБ необходимо определить какие данные модель получает на вход.

Исходными данными для формирования признаков динамической модели управления являются разнородные потоки оперативных данных из внутренних и внешних источников, используемые для вычисления частных показателей подсистем «Человек», «Техника», «Логистика», а также последующего расчёта комплексного показателя оперативной готовности оперативно-выездной бригады в рамках динамической модели управления ОВБ. Указанные данные характеризуют текущее состояние оперативно-выездной бригады и параметры аварийной ситуации на момент принятия управленческого решения и включают:

- данные о составе персонала, уровне компетенций, допусках и режиме работы членов бригады;
- сведения о наличии, доступности и техническом состоянии оборудования и специализированной техники;
- данные о текущей логистической обстановке, включая местоположение бригады, дорожную ситуацию и погодные условия;
- параметры аварийной ситуации, включая тип повреждения и требования к проведению восстановительных работ.

Указанные данные поступают асинхронно, характеризуются различной степенью достоверности и могут содержать пропуски.

Кроме того, часть данных представлена в текстовой или категориальной форме с нефиксированной семантикой, что затрудняет их прямое использование в расчётах.

Таким образом необходима процедура формирования признаков, обеспечивающая корректное сопоставление и совместное использование параметров различной природы, относящихся к подсистемам «Человек», «Техника», «Логистика», за счёт устранения асинхронности по времени

обновления данных и неоднозначности их семантической интерпретации. Это позволяет использовать полученные признаки в качестве входных переменных динамической модели управления ОВБ и обеспечивает воспроизводимый расчёт частных и комплексного показателей готовности ОВБ.

Решением данной задачи является формирование единого временно и семантически согласованного слоя признаков.

В традиционных подходах к обработке данных подобная неоднородность, как правило, устраняется путём жёсткого приведения всех параметров к единственному агрегированному значению. Однако такое упрощение приводит к потере информации о качестве, источнике и степени достоверности данных, что значимо в условиях аварийно-восстановительных работ.

В предлагаемом численном методе используется иной подход, основанный на формировании структуры признакового описания состояния оперативно-выездной бригады, при которой каждый признак, используемый при оценке готовности бригады, формируется через преобразование данных через совокупность взаимосвязанных слоёв данных.

Идея разделения данных на уровни используется в ряде направлений, связанных с обработкой неопределённой и неполной информации, включая модели с метаданными качества и контекста измерений [111]. В этих работах показано, что явное хранение информации о происхождении и надёжности данных повышает устойчивость аналитических процедур.

Многоуровневые представления данных применяются в задачах объединения информации и ситуационного анализа для повышения устойчивости решений в условиях неопределённости [104]. Вместе с тем большинство существующих работ ориентировано на задачи распознавания и классификации и не рассматривает влияние слоев данных в БД на процесс последовательного принятия управленческих решений во времени.

Новизна предлагаемого подхода заключается в том, что формирование признаков посредством нескольких слоев используется как часть метода управления и непосредственно влияет на вычисление частных и комплексного

показателей оперативной готовности ОВБ. Неоднородность исходных данных учитывается в явном виде, что повышает воспроизводимость управленческих решений в условиях неполноты и рассинхронизации информации.

Введем формальную постановку задачи. Для каждой пары «бригада – инцидент» (b, i) , где $b \in B$, $i \in I$, и для момента принятия управленческого решения $t \in T$ требуется построить вектор признаков, полученный из согласованного информационного слоя $Z(t)$.

Для формализации деструктивных факторов информационной среды в работе принимается предположение о выделении трёх взаимосвязанных групп искажений [100; 119]:

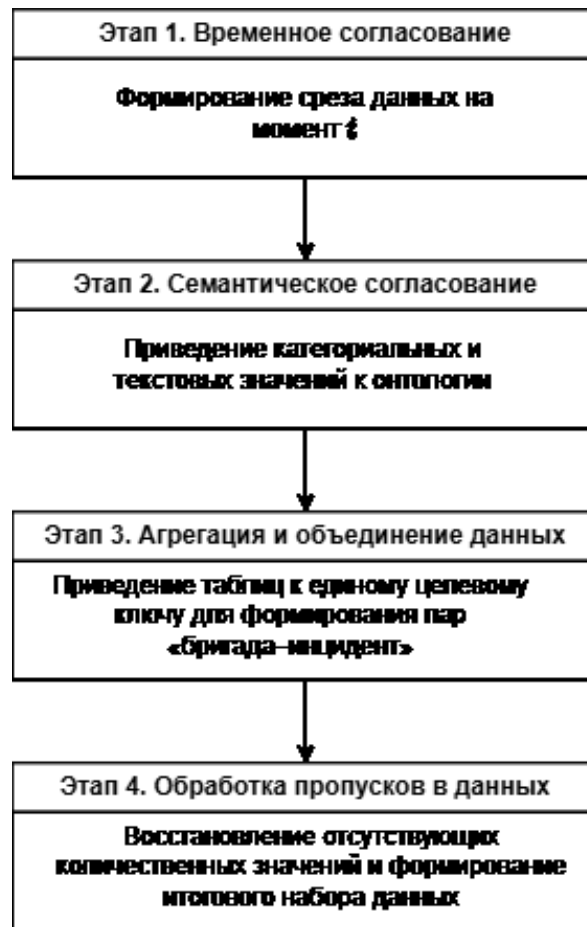
- временные искажения (асинхронность поступления данных) описываются слоем актуальности данных;
- семантические искажения (неоднозначность интерпретации) описываются слоем семантической определённости;
- информационные искажения (неполнота, пропуски, недостоверность) описываются слоем качества данных.

Таким образом, в рамках принятого предположения выделяются три слоя данных: темпоральный, семантический и информационный. Их состав фиксирован для рассматриваемой задачи, а конкретный набор метаданных внутри каждого слоя определяется доступными источниками данных.

Метод формирования пространства признаков реализует последовательный переход от исходного множества записей Z к согласованному слою $Z^{(4)}(t)$ (35), путем последовательного расчета признаков и формирования соответствующих слоев. Предлагаемый метод обработки данных представлен на рисунке 9 и включает последовательность взаимосвязанных этапов.

На первом этапе осуществляется приведение разнородных данных к временно согласованному виду, под которым в диссертационной работе понимается формирование такого среза данных, в котором каждому моменту принятия управленческого решения сопоставляются исключительно те значения параметров, которые были доступны системе управления на этот момент времени.

Слой временной корректности формируется на основе идей темпоральной согласованности данных и отражает различия между моментом измерения параметра и моментом его использования в модели управления. Аналогичные подходы используются в темпоральной аналитике, однако в данной работе они адаптированы к задаче предотвращения утечек апостериорной информации при моделировании управленческих решений.



Источник: составлено автором.

Рисунок 9 – Последовательность этапов формирования согласованного пространства признаков данных

При этом для формирования признакового слоя используются только те значения параметров, которые были получены и зафиксированы в информационных системах до момента принятия решения, без привлечения данных, ставших известными позднее. Такой подход исключает использование апостериорной информации и обеспечивает корректность моделирования реального процесса принятия управленческих решений в динамической системе.

На втором этапе выполняется семантическое согласование категориальных и текстовых данных. С использованием онтологического представления предметной области и методов интеллектуального сопоставления производится приведение исходных текстовых описаний аварий, оборудования и работ к ограниченному набору канонических категорий, что позволяет устранить семантическую неоднородность данных, возникающую вследствие различий в терминологии и стиле описаний. Слой семантической согласованности основан на методах онтологического выравнивания и семантического сопоставления данных, применяемых в задачах интеграции знаний [92].

На третьем этапе выполняется агрегация и унификация данных, которая позволяет перейти от разнородных параметров отдельных объектов к единому описанию оперативно-выездной бригады как единого объекта управления.

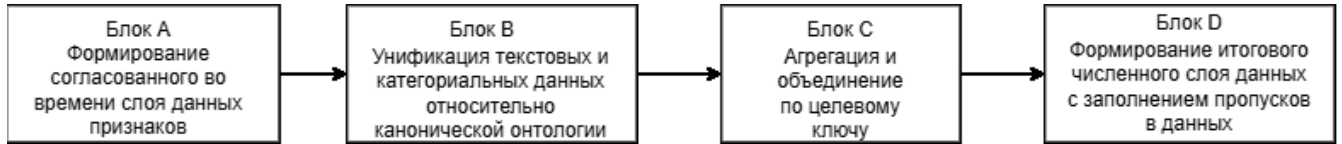
На четвертом этапе выполняется обогащение данных. Слой качества данных включает восстановленных значений и способов получения параметров с учетом качества данных. Подобные подходы применяются в задачах анализа данных с пропусками [115].

Полученный итоговый слой признаков объединяет информацию, характеризующую человеческую составляющую бригады, её техническое оснащение и логистические условия выезда, и тем самым обеспечивает целостное представление объекта управления, необходимое для расчёта частных и интегральных показателей оперативной готовности.

Следует отметить, что отдельные операции, используемые на данном этапе метода, такие как формирование временного среза данных по принципу последнего известного значения, агрегация признаков на уровне групп объектов и применение стандартных статистических операторов, применяются в задачах анализа данных, управления техническими системами и построения витрин данных. В частности, операции выбора последнего валидного состояния объекта к моменту времени используются в задачах темпоральных баз данных [134]. Оригинальность методики заключается не в самих операциях агрегации, а многоуровневой организации признакового пространства, количество и состав

слоёв которого адаптивно определяется уровнем семантической неоднородности исходных данных.

Алгоритмически метод может быть реализован в виде нескольких расчетных блоков, как показано на рисунке 10.



Источник: составлено автором.

Рисунок 10 – Последовательность вычислительных блоков алгоритма трансформации данных

Теперь более подробно рассмотрим реализацию каждого блока расчета параметров.

Блок А формирует согласованный во времени слой признаков на момент принятия решения t , исключая поступления данных о будущей информации при наличии ретроспективных обновлений данных.

Пусть t – момент формирования таблицы признаков. Для каждой таблицы сначала исключаются сведения, которые относятся к будущему либо ещё не были доступны системе к моменту t по формуле (13).

Для таблиц, описывающих версии состояния сущности, для каждого ключа $k \in K$ выбирается последняя известная на момент t версия записи согласно формуле (25)

$$z_{n,k}^*(t) = \arg \max_{z \in Z_n^{adm}(t), k_n(z)=k}^{lex} (t_z^{obs}, t_z^{reg}), \quad (25)$$

где $z_{n,k}^*(t)$ – последняя известная версия записи таблицы Z_n для ключа k на момент t ;

$\arg \max^{lex}$ – лексикографический максимум; сначала выбирается максимальное t_z^{obs} , а при его совпадении, максимальное t_z^{reg} ;

$k_n(z)$ – значение целевого ключа записи z ;

t_z^{obs} – момент наблюдения или момент времени, к которому относится значение в записи;

t_z^{reg} – момент регистрации записи в информационной системе.

Результат временного согласования отдельной таблицы формируется как множество последних известных версий записей для всех её ключей по выражению (26)

$$Z_n^{(1)}(t) = \{z_{n,k}^*(t) \mid k \in K_n\}. \quad (26)$$

После временной фильтрации и приведения записей к уровню целевого ключа выполняется сопоставление текстовых и категориальных атрибутов с онтологией.

В Блоке B выполняется семантическое выравнивание текстовых данных.

Пусть онтология представлена множеством (27)

$$\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_m\}, \quad (27)$$

где Ω – множество понятий онтологии;

ω_j – j -е понятие онтологии $j \in \{1, \dots, m\}$.

Для каждого понятия $\omega_j \in \Omega$ заранее хранится его векторное представление $e(\omega_j)$. Векторное представление исходного значения и понятия онтологии определяется одной функцией преобразования текста по формуле (28)

$$e(c^{text}) = \Psi(c^{text}), \quad (28)$$

где c^{text} – исходное текстовое или категориальное значение;

Ψ – модель построения векторного представления текста или категориального значения.

Векторные представления получены с использованием БЯМ модели.

Наиболее близкое понятие для атрибута a определяется по максимуму косинусной близости согласно правилу (29)

$$ont_a(c^{text}) = \begin{cases} \omega_a^*(c^{text}), & \max_{\omega \in \Omega_a} \frac{e(c^{text})^T e(\omega)}{\|e(c^{text})\| \|e(\omega)\|} \geq \eta \\ NA, & \max_{\omega \in \Omega_a} \frac{e(c^{text})^T e(\omega)}{\|e(c^{text})\| \|e(\omega)\|} < \eta \end{cases}, \quad (29)$$

где $ont_a(c^{text})$ – онтологически нормализованное значение атрибута;

$e(c^{text})$ – векторное представление текста исходного значения;

$e(\omega)$ – векторное представления j -го понятия онтологии;

ω_a^* – наиболее близкое значение текста в онтологии;

η – порог качества сопоставления.

Тогда таблица после семантического согласования формируется непосредственно из таблицы актуальных записей по формуле (30)

$$Z_n^{(2)}(t) = \{z[v_{z,a} \leftarrow ont_a(v_{z,a}), a \in Atr_n^{text}] | z \in Z_n^{(1)}(t)\}, \quad (30)$$

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 C выполняется перед объединением таблиц для каждого целевого ключа обеспечивается единственность строки в каждой семантически согласованной таблице в соответствии с условием (31)

$$\forall n \in N, \forall k \in K: \left| \{z \in Z_n^{(2)}(t) | k_n(z) = k\} \right| \leq 1, \quad (31)$$

где N – количество таблиц;

K – множество ключей.

Формируется базовое отношение пар $R_0(t) = B(T) \times I(T)$. Семантически согласованные таблицы предварительно агрегируются до уровня соответствующего целевого ключа и присоединяются к базовому отношению последовательными левыми соединениями, что исключает появление строк, не соответствующих реальной паре «бригада – инцидент», и сохраняет пары даже при отсутствии части признаков.

Семантически согласованные таблицы объединяются по целевому ключу операцией внешнего соединения, формирующей единую таблицу признаков по формуле (32)

$$Z^{(3)}(t) = LEFTJOIN_k(Z_1^{(2)}(t), Z_2^{(2)}(t), \dots, Z_n^{(2)}(t)), \quad (32)$$

где $Z^{(3)}(t)$ – единая объединённая таблица;

$LEFTJOIN$ – операция внешнего соединения по целевому ключу;

k – ключ объединения.

Блок D формирует итоговый численно пригодный слой признаков из $Z^{(3)}(t)$, устраняя пропуски в данных.

Для каждого количественного атрибута значение, используемое при восстановлении пропусков, определяется как медиана его непустых значений в объединённой таблице согласно формуле (33)

$$m_a(t) = \text{med} \{v_{z,a}^{(3)} \mid z \in Z^{(3)}(t), v_{z,a}^{(3)} \neq NA\}, \quad (33)$$

где $m_a(t)$ – медиана количественного атрибута a , $a \in A_n^{num}$;
 med – оператор вычисления медианы;
 $v_{z,a}^{(3)}$ – значение атрибута a в записи z объединённой таблицы;
 NA – отсутствующее значение.

Пропущенные количественные значения заменяются рассчитанной медианой, а наблюдаемые значения сохраняются без изменения по правилу (34)

$$v_{z,a}^{(4)} = \begin{cases} m_a(t), & a \in Atr_n^{num} \wedge v_{z,a}^{(3)} = NA \\ v_{z,a}^{(3)}, & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (34)$$

где $v_{z,a}^{(4)}$ – значение атрибута после обработки пропусков;
 $m_a(t)$ – медиана количественного атрибута.

Итоговая таблица признаков после заполнения количественных пропусков формируется из объединённой таблицы согласно выражению (35)

$$Z^{(4)}(t) = \{z[v_{z,a}^{(3)} \leftarrow v_{z,a}^{(4)}, a \in Atr_n^{num}] | z \in Z_n^{(3)}(t)\}, \quad (35)$$

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 после применения правила (34).

Предполагается, что для одного ключа не существует двух различных записей с одинаковой парой (t_z^{obs}, t_z^{reg}) при наличии таких записей используется дополнительный идентификатор версии.

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

3.3 Расчёт частных показателей готовности оперативно-выездных бригад

В результате применения алгоритма обработки данных, описанной в разделе 3.2, для каждого момента принятия управленческого решения формируется временно и семантически согласованный слой признаков, представляющий состояние оперативно-выездной бригады и условий ликвидации аварии в виде вектора параметров фиксированной размерности.

Сформированный признаковый слой содержит значения параметров, относящихся к подсистемам «Человек», «Техника», «Логистика». Наличие такого слоя означает, что исходные разнородные данные приведены к численно и семантически сопоставимому виду и могут быть непосредственно использованы в расчётах без риска нарушения временной корректности или логической несогласованности.

После завершения этапа формирования признакового слоя задача расчёта комплексного показателя оперативной готовности сводится к последовательному вычислению частных показателей подсистем «Человек», «Техника», «Логистика» на основании полученных признаков.

В настоящем разделе определяется метод расчёта частных показателей оперативной готовности для каждой из подсистем эргатической системы «Человек – Техника – Логистика». Для каждого частного показателя задаются состав используемых признаков, процедуры их нормировки и агрегации. Полученные частные показатели далее используются для вычисления интегрального показателя оперативной готовности оперативно-выездной бригады в рамках динамической модели управления, описанной в предыдущих главах.

Метод расчета частного показателя «Человек».

Частный показатель «Человек» предназначен для количественной оценки степени готовности персонала оперативно-выездной бригады к выполнению аварийно-восстановительных работ в конкретных условиях инцидента. Показатель отражает совокупное влияние профессиональных компетенций,

накопленного опыта, текущего функционального состояния и сработанности персонала, а также учитывает ограничения, связанные с доступностью и допусками сотрудников.

Частный показатель «Человек» состоит из нескольких компонент, каждая из которых отражает меру готовности ОВБ:

- наличие требуемых компетенций – мера соответствия навыков персонала требованиям аварии;
- опыт участия в ликвидации сходной аварии – функция от количества выполненных аналогичных работ;
- наличие обучения по требуемой специфике работы – функция времени, прошедшего с момента последнего прохождения профильных тренировок и инструктажей;
- сработанность бригады – метрика, отражающая постоянство состава бригады;
- текущее состояние персонала – показатель, учитывающий накопленную рабочую нагрузку, продолжительность смены и доступность сотрудников бригад.

Для квазикачественных характеристик, таких как усталость или сработанность бригады, используются количественные оценки по экспертно-заданным шкалам, приведённые к диапазону [0;1].

Итоговый частный показатель «Человек» вычисляется в виде агрегированной функции от перечисленных компонент по формуле (36)

$$H_{b,i}(t) = \chi_{b,i} \left(\prod_{j=1}^5 C_j^H \beta_j \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^5 \beta_j}}, \quad (36)$$

где C_j^H – нормированное значение j -й компоненты расчета частного показателя «Человек» для рассматриваемой пары;

β_j – весовой коэффициент соответствующей компоненты;

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

Далее опишем расчет каждой из компонент общей функции для расчета $H_{b,i}(t)$.

Компонента 1. Покрывтие компетенций ($j=1$). Компонента характеризует соответствие профессиональных компетенций сотрудников текущего состава бригады требованиям конкретного инцидента.

Пусть $P_b(t)$ – множество сотрудников, входящих в состав бригады b в момент времени t . Для инцидента i формируется текстовое описание требований к компетенциям персонала, обозначаемое txt_i^{req} . Для каждого сотрудника $p \in P_b(t)$ формируется текстовое описание его профессиональных компетенций, обозначаемое $txt_p^{comp}(t)$.

Для перевода текстовых описаний в векторное пространство используется одна и та же функция Ψ (28) векторного представления текста БЯМ, которая переводит текст в векторное представление e размерности R^d .

Семантическая близость компетенций сотрудника требованиям инцидента определяется по формуле (37)

$$sim_{p,i} = \frac{(e_p^{comp})^T e_i^{req}}{\|e_p^{comp}\| \|e_i^{req}\|}, \quad (37)$$

где $sim_{p,i}$ – семантическая близость компетенций сотрудника требованиям инцидента;

e_p^{comp} – векторное представление компетенций сотрудника p ;

e_i^{req} – векторное представление требований инцидента i .

Поскольку значение косинусного сходства лежит в $[-1; 1]$, для нормировки на $[0; 1]$ по формуле (38)

$$\widehat{sim}_{p,i} = \frac{sim_{p,i} + 1}{2}. \quad (38)$$

Для оценки покрытия компетенций на уровне бригады может использоваться оператор среднего арифметического, позволяющий учитывать вклад каждого сотрудника в общую готовность состава к ликвидации конкретной аварии. В этом случае показатель покрытия компетенций определяется как среднее значение индивидуальных оценок соответствия компетенций сотрудников требованиям инцидента по формуле (39)

$$C_{j,b,i}^H(t) = \frac{1}{|P_b(t)|} \sum_{p \in P_b(t)} \widehat{sim}_{p,i}, \quad (39)$$

где $P_b(t)$ – множество сотрудников в бригаде;

$\widehat{sim}_{p,i}$ – нормированная оценка семантической близости компетенций сотрудника требованиям аварии.

Компонента 2. Релевантный опыт ($j=2$). Вклад релевантного опыта в готовность персонала описывается функцией насыщения, отражающей убывающую предельную полезность повторных аналогичных работ, по формуле (40)

$$C_{j,b,i}^H(t) = 1 - e^{-\frac{n_{b,i}^{rel}(t)}{\tau_{exp}}}, \quad \tau_{exp} > 0, \quad (40)$$

где n_{rel} – суммарное количество работ, выполненных сотрудниками текущего состава;

τ_{exp} – параметр масштаба, определяющий точку насыщения (экспертная оценка).

Параметр определяется по историческим данным о выполненных АВР путём аппроксимации зависимости результативности выполнения работ от количества ранее выполненных работ, соответствующего тип по формуле (41)

$$\tau_{exp} = \arg \min_{\tau > 0} \sum_r \left[y_r - \left(1 - e^{-\frac{n_r^{rel}}{\tau}} \right) \right]^2, \quad (41)$$

где y_r – нормированный исторический показатель результативности.

Опыт повышает скорость и надёжность действий, но после некоторого числа аналогичных работ его предельный вклад уменьшается. Экспоненциальная функция моделирует закон убывающей предельной полезности опыта: первые несколько аналогичных работ дают существенный прирост эффективности, дальнейшее увеличение числа работ даёт всё меньший прирост.

Компонента 3. Актуальность обучения и допусков ($j=3$). Компонента учитывает время, прошедшее с момента последнего подтверждения квалификации сотрудников согласно формуле (42)

$$C_{j,b,i}^H = \min_{p \in P_{b,i}(t)} \min_{q \in Q_i(t)} \max(0, 1 - \frac{t - t_{p,q}^{last}(t)}{T_q^{valid}}, \quad (42)$$

где $P_{b,i}(t)$ – множество сотрудников бригады b , рассматриваемых для выполнения работ по инциденту i в момент t ;

$Q_i(t)$ – множество видов обучения и допусков, требуемых сотруднику p для выполнения работ по инциденту i ;

$t_{p,q}^{last}(t)$ последний на момент зарегистрированный факт прохождения сотрудником соответствующего обучения;

T_q^{valid} – нормативный период действия соответствующего обучения.

Следовательно, используется наиболее позднее обучение данного сотрудника, которое соответствует виду обучения, требуемому для рассматриваемого инцидента, и содержится в информационной системе на момент принятия решения.

Компонента 4. Сработанность бригады ($j=4$). Компонента отражает эффективность взаимодействия внутри бригады, которая накапливается с совместным опытом и снижается при изменении состава по формуле (43)

$$C_{j,b}^H(t) = \left(1 - e^{-\frac{n_b^{joint}(t)}{\tau_{team}}} \right) k_{stab}, \quad (43)$$

где $n_b^{joint}(t)$ – число совместных выездов текущего состава за выбранный ретроспективный период;

$k_{stab} \in [0; 1]$ – коэффициент стабильности состава бригады;

τ_{team} – параметр насыщения совместного опыта.

Формула (43) позволяет учитывать накопление совместного опыта (эффект насыщения) и его изменения при ротации состава.

Коэффициент стабильности состава бригады показывает среднюю долю сотрудников текущего состава, которые работали вместе в предыдущих выездах и определяется по формуле (44)

$$k_{stab} = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \frac{|P_b(t) \cap P_b(t_r)|}{|P_b(t)|}, \quad (44)$$

где N – число совместных выездов текущего состава за выбранный ретроспективный период;

$P_b(t)$ – текущий состав бригады;

$P_b(t_r)$ – состав во время r -го предшествующего выезда.

Компонента 5. Текущее состояние персонала (j=5) Компонента текущего состояния персонала учитывает усталость и рабочую нагрузку сотрудников бригады. Текущее функциональное состояние персонала определяется с учётом максимальной продолжительности работы сотрудников в смене по формуле (45)

$$C_{j,b}^H = \min_{p \in P_b(t)} \max(0, 1 - \frac{h_p(t)}{h^{max}}), \quad (45)$$

где $h_p(t)$ – продолжительность работы сотрудника p в текущей смене;
 h^{max} – нормативно допустимая продолжительность смены.

Наличие обязательных кадровых допусков и отсутствие запретов учитываются бинарным корректирующим множителем, задаваемым формулой (46)

$$\chi_H = \begin{cases} 1, & \text{если нет кадровых запретов} \\ 0, & \text{в ином случае} \end{cases}. \quad (46)$$

Метод расчета частного показателя «Техника».

Данный показатель позволяет количественно оценить степень готовности техники и наличия оборудования для выполнения заданной АВР. Показатель отражает фактическую исправность и пригодность транспортных средств, основного и вспомогательного оборудования, обеспеченность необходимыми инструментами и запасными частями, а также экономическую и эксплуатационную допустимость их использования.

Частный показатель «Техника» вычисляется как произведение от нормированных компонент технической готовности по формуле (47)

$$E_{b,i}(t) = \chi_E \left(\prod_{j=1}^4 C_j^{E \gamma_j} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^4 \gamma_j}}, \quad (47)$$

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.

Компонента 1. Готовность транспортных средств ($j=1$) Компонента отражает техническую исправность и эксплуатационную пригодность транспортных средств, закреплённых за депо, с учётом их состояния, оснащённости и соответствия условиям выезда и доступности конкретной бригаде.

Поскольку для выезда ОВБ требуется хотя бы одно пригодное транспортное средство нужного типа, определим функцию (48)

$$C_{j,b,i}^E(t) = \max_{v \in V_b(t)} c_v^E a_{v,i}, \quad (48)$$

где v – техническое средство из множества $V_b(t)$;
 c_v^E – техническая готовность транспортного средства по данным комплексов технологических операций и организационных действий;
 $a_{v,i}$ – бинарная переменная соответствия технического средства работам i .

Компонента 2. Исправность основного оборудования ($j=2$). Компонента оценивает готовность основного необходимого оборудования, без которого выполнение работ невозможно.

Введем множество E_{main} – множество обязательного оборудования, без которого невозможно проведение работ. Готовность основного оборудования определяется минимальным значением его частных оценок по формуле (49)

$$C_{j,b,i}^E(t) = \min_{e_{main} \in E_i^{main}} r_{b,e_{main}}(t), \quad (49)$$

где $u_{b,e^{main}}(t)$ – готовность оборудования e^{main} , фактически включённого в оснащение для b .

Компонента 3. Исправность вспомогательного оборудования ($j=3$).

Пусть E_{aux} – множество элементов вспомогательного оборудования. Исправность вспомогательного оборудования оценивается усреднением частных оценок всех доступных элементов по формуле (50)

$$C_{j,b,i}^E(t) = \frac{1}{|E_i^{aux}|} \sum_{e^{aux} \in E_i^{aux}} r_{b,e}(t), \quad (50)$$

где E_i^{aux} – множество вспомогательного оборудования, рекомендуемого для данного вида работ.

В данной компоненте использовано аддитивное усреднение допустимо, поскольку отсутствие одного элемента может быть частично компенсировано другим оборудованием.

Компонента 4. Ресурсная обеспеченность ($j=4$). Компонента позволяет оценить степень обеспеченности бригады ресурсами: запасными частями, расходными материалами, ГСМ.

Пусть R_i^{res} – множество ресурсов, необходимых для ликвидации АВР. Степень обеспеченности по каждому ресурсу задается отношением фактического запаса к нормативному, а общая обеспеченность ресурсами определяется по минимальному ресурсу в наличии по формуле (51)

$$C_{res}^E = \min_{r_{res} \in R_i^{res}} \min \left(1, \frac{n_{b,res}(t)}{n_{i,res}^{req}(t)} \right), \quad (51)$$

где n_{res} – фактический запас ресурса;

$n_{i,res}^{req}$ – требуемое для полноценного выполнения работ количество ресурса.

Корректирующий множитель ограничений χ_E технической оснащенности определяется по формуле (52)

$$\chi_E = \begin{cases} 1, & E_i^{crit} \subseteq E_b^{ok}(t) \\ \kappa_i^E, & \text{если замена допустима регламентом} \\ 0, & \text{если отсутствует критически необходимая техника} \end{cases}, \quad (52)$$

где E_i^{crit} – множество критически требуемого оборудования для инцидента i ;
 E_b^{ok} – множество фактически доступного оборудования для бригады b в момент t ;
 κ_i^E – коэффициент доступной регламентной замены, определяется на основании исторических данных.

Метод расчета частного показателя «Логистика».

Частный показатель «Логистика» вычисляется как функция от нормированных логистических компонент по формуле (53)

$$L_{b,i}(t) = \chi_L \left(\prod_{j=1}^2 C_j^L \delta_j \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^2 \delta_j}}, \quad (53)$$

где C_j^L – нормированные компоненты логистической готовности;
 δ_j – степень важности вклада каждой компоненты;
 $\chi_L \in [0; 1]$ – корректирующий множитель логистических ограничений.

Компонента 1. Временная достижимость ($j=1$). Компонента отражает степень соответствия прогнозируемого времени прибытия бригады к месту аварии нормативно допустимым временным ограничениям. Для вычисления ожидаемого времени прибытия $ETA_{b,i}(t)$ используется алгоритм Дейкстры [22; 89], предназначенный для поиска кратчайшего пути во взвешенном графе

с неотрицательными весами рёбер. Для пары (b,i) алгоритмом Дейкстры определяется маршрут $R_{b,i}^*(t)$ минимизирующий суммарное ожидаемое время движения.

Временная достижимость является наиболее значимым фактором логистической готовности, поскольку превышение допустимого времени прибытия делает невозможным достижение заданной оперативности восстановления электроснабжения и определяется по формуле (54)

$$C_{j,b,i}^L(t) = e^{-\frac{ETA_{b,i}(t)}{T_i^{arr}}}, \quad (54)$$

где $ETA_{b,i}(t)$ – расчётное время прибытия бригады, полученное на основе маршрутизации;

T_i^{arr} – нормативно допустимое время прибытия для данного типа аварии.

Компонента 2. Погодные условия ($j=2$). Влияние неблагоприятных погодных условий на логистическую готовность учитывается с заданным коэффициентом чувствительности по формуле (55)

$$C_j^L(t) = W(t), \quad (55)$$

где $W(t) \in [0; 1]$ – нормированная оценка погодных условий на маршруте и в предполагаемый период следования бригады.

Корректировка показателя осуществляется посредством множителя ограничений по формуле (56)

$$\chi_L = \begin{cases} 1, & \text{если маршрут допустим и } ETA_{b,i} \leq T_i^{arr} \\ k_i^L, & \text{если допустим объезд и } ETA_{b,i} \leq T_i^{arr} \\ 0, & \text{если и } ETA_{b,i} > T_i^{arr} \end{cases}, \quad (56)$$

где $ETA_{b,i}$ – время прибытия на аварию;

T_i^{arr} – нормативное время;

k_i^L – штрафной коэффициент, учитывающий увеличение расстояния, продолжительности или сложности маршрута при допустимом объезде.

3.4 Метод расчёта весовых коэффициентов для учета важности подсистем

Как было представлено в разделе 3.1, для расчёта комплексного показателя готовности ОВБ необходимо определить весовые коэффициенты частных показателей, характеризующие их относительную значимость.

Разрабатываемый метод определения весовых коэффициентов должен обеспечивать воспроизводимую оценку относительной значимости частных показателей при ограниченном объёме исходных экспертных данных.

В работе предложен метод определения весовых коэффициентов частных показателей в многокритериальной задаче назначения ОВБ на инцидент, основанный на статистическом анализе экспертных оценок, учете компетентности экспертов и аппроксимации.

В отличие от методов, основанных на комбинировании заранее заданных алгоритмов взвешивания и их согласовании по ранговым показателям [65], в диссертации сформулирована гипотеза о возможности повышения эффективности определения весовых коэффициентов путем аппроксимации функциональной зависимости между статистическими характеристиками критериев и их относительной значимостью.

Предлагаемый метод основан на гипотезе о том, что важность критерия объективно отражается в статистической структуре распределения его оценок по альтернативам, а также во взаимосвязях с другими критериями. В отличие от традиционных количественных методов, использующих один или несколько агрегированных показателей, в данной работе формируется

многомерное признаковое описание каждого критерия, после чего задача определения весов сводится к задаче регрессии.

Пусть задано множество альтернатив (57)

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}, \quad (57)$$

которые оцениваются по множеству критериев (58)

$$Cr = \{Cr_1, Cr_2, \dots, Cr_N\}. \quad (58)$$

Экспертные оценки альтернатив по всем критериям представляются матрицей, строки которой соответствуют альтернативам, а столбцы критериям, по формуле (59)

$$X^{expert} = \begin{pmatrix} x_{1,1}^{expert} & x_{1,2}^{expert} & \dots & x_{1,N}^{expert} \\ x_{2,1}^{expert} & x_{2,2}^{expert} & \dots & x_{2,N}^{expert} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M,1}^{expert} & x_{M,2}^{expert} & \dots & x_{M,N}^{expert} \end{pmatrix}, \quad (59)$$

где $x_{M,N}^{expert}$ – значение m -й альтернативы по n -му критерию.

Требуется определить вектор весовых коэффициентов (60)

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T, \quad (60)$$

удовлетворяющих требованиям нормировки, которые задаются условием (61)

$$w_n \geq 0, \sum_{n=1}^N w_n = 1. \quad (61)$$

Для каждого критерия Cr_n рассматривается вектор его оценок на основании статистик таблицы 1.

Таблица 1 – Статистики для формирования признаков в модели назначения весовых коэффициентов

Основные статистические характеристики	
Математическое ожидание	$\mu_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M x_{m,n}$
Стандартное отклонение	$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (x_{m,n} - \mu_n)^2}$
Минимум и максимум	$x_n^{\min} = \min_m x_{m,n}, x_n^{\max} = \max_m x_{m,n}$
Размах	$R_n = x_n^{\max} - x_n^{\min}$
Коэффициент вариации	$CV_n = \frac{\sigma_n}{ \mu_n + \varepsilon}$
Квантильные характеристики	
Медиана	$\widetilde{x}_n = median(x_n)$
Первый и третий квартили	$Q_{0.25n}, Q_{0.75n}$
Межквартильный размах	$IQR_n = Q_{0.75n} - Q_{0.25n}$
Характеристики формы распределения	
Коэффициент асимметрии	$Skew_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left(\frac{x_{m,n} - \mu_n}{\sigma_n} \right)^3$
Коэффициент эксцесса	$Kurt_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left(\frac{x_{m,n} - \mu_n}{\sigma_n} \right)^4 - 3$
Средняя корреляция	$\bar{\rho}_n = \frac{1}{N-1} \sum_{k \neq n} \rho_{n,k} $
Максимальная корреляция	$\rho_n^{\max} = \max_{k \neq n} \rho_{n,k} $
Энтропийная характеристика	
Энтропия критерия	$Ent_n = -\frac{1}{\ln M} \sum_{m=1}^M p_{m,n} \ln p_{m,n}$

Источник: составлено автором.

Таким образом, каждому критерию Cr_n сопоставляется вектор признаков по формуле (62)

$$y_n = \left(\mu_n, \sigma_n, x_n^{\min}, x_n^{\max}, R_n, CV_n, \widetilde{x}_n, Q_{0.25,n}, Q_{0.75,n}, \right. \\ \left. IQR_n, Skew_n, Kurt_n, \overline{\rho}_n, \rho_n^{\max}, Ent_n \right)^T. \quad (62)$$

В методике весовые коэффициенты рассматриваются как линейная функция признаков по формуле (63)

$$w_r^{ref} = y_r^T \theta + \xi_n, \quad (63)$$

где w_n^{ref} – референсное значение веса;
 y_r^T – вектор статистических признаков r -го обучающего наблюдения;
 θ – вектор параметров модели;
 ξ_n – случайная ошибка модели.

Для оценки параметров используется Ridge-регрессия, решение которой определяется задачей оптимизации согласно формуле (64)

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{r=1}^N (w_r^{ref} - y_r^T \theta)^2 + \lambda_{reg} \sum_{j=1}^{P_z} \theta_j^2, \quad (64)$$

где P_z – размерность вектора признаков;
 λ_{reg} – параметр регуляризации.

Для текущего набора альтернатив модель формирует ненормированные прогнозные веса $\tilde{w}_n$ по формуле (65)

$$\tilde{w}_n = y_n^T \hat{\theta}. \quad (65)$$

Полученные значения весов нормализуются по формуле (66)

$$w_n = \frac{\max(\tilde{w}_n, \varepsilon)}{\sum_{k=1}^N \max(\tilde{w}_k, \varepsilon)}. \quad (66)$$

В задаче определения весовых коэффициентов критериев на основе статистических характеристик экспертных оценок важным требованием к используемому методу являются интерпретируемость результата, устойчивость к мультиколлинеарности признаков и снижение чувствительности оценок к шуму. Указанные требования обусловлены структурой исходных данных и спецификой задачи взвешивания частных показателей.

Сформированное признаковое описание критериев включает показатели центральной тенденции, разброса, формы распределения, корреляционных связей и информационной насыщенности. Значительная часть этих признаков является статистически взаимосвязанной. Так, стандартное отклонение, размах и межквартильный размах отражают схожие аспекты вариативности; энтропия критерия коррелирует с коэффициентом вариации; показатели корреляции связаны с дисперсионными характеристиками. В условиях ограниченного числа критериев подобная мультиколлинеарность может приводить к неустойчивости оценок параметров в классических линейных регрессионных моделях и снижать воспроизводимость полученных весов.

Ridge-регрессия, основанная на L_2 -регуляризации, позволяет решать указанную проблему за счёт включения штрафного слагаемого, пропорционального сумме квадратов коэффициентов модели. Регуляризация уменьшает нестабильность коэффициентов при взаимосвязанных признаках и повышает устойчивость оценок весов. При этом каждый коэффициент отражает вклад соответствующей статистической характеристики в формирование веса, что сохраняет интерпретируемость метода.

Следует также отметить, что задача назначения весовых коэффициентов критериев в многокритериальной модели оценки не требует аппроксимации сложных нелинейных зависимостей, а предполагает выявление устойчивых глобальных закономерностей между структурой данных и относительной значимостью критериев. В этом контексте применение

сложных ансамблевых или нейросетевых моделей может приводить к избыточной адаптации к обучающей выборке и снижению обобщающей способности метода. Ridge-регрессия, напротив, обеспечивает компромисс между точностью аппроксимации и устойчивостью модели.

Следовательно, использование Ridge-регрессии в рамках предлагаемого метода позволяет повысить устойчивость оценок весовых коэффициентов, снизить влияние мультиколлинеарности статистических признаков, сохранив интерпретируемую линейную форму зависимости, что делает данный подход методологически обоснованным и практически пригодным для задач многокритериального принятия решений.

Общий метод определения весовых коэффициентов включает следующие этапы:

- 1) Формирование матрицы экспертных оценок.
- 2) Вычисление статистических признаков критериев.
- 3) Построение матрицы признаков.
- 4) Обучение регрессионной модели.
- 5) Прогноз весов критериев и их нормализация.

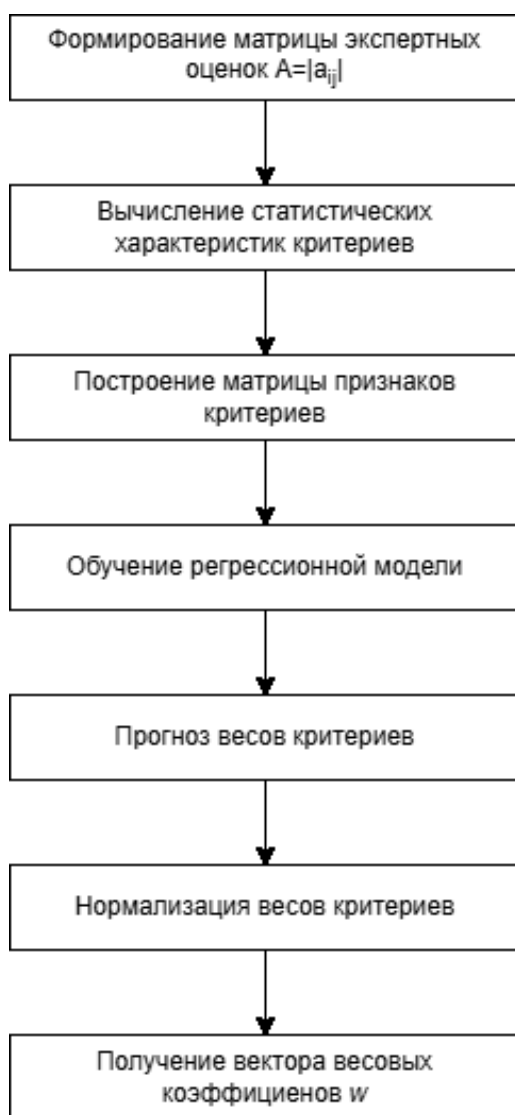
Схема предлагаемого алгоритма определения весовых коэффициентов критериев на основе статистических характеристик экспертных оценок представлена на рисунке 11.

Алгоритм отражает последовательность этапов обработки данных, начиная от формирования матрицы экспертных оценок альтернатив и заканчивая получением нормализованного вектора весов критериев, используемого в дальнейшем при расчёте комплексного показателя.

В результате применения предложенного метода каждому критерию многокритериальной модели сопоставляется количественно обоснованный весовой коэффициент, отражающий его относительную значимость при формировании интегрального показателя. Использование статистических характеристик распределения экспертных оценок позволяет учитывать не только средний уровень значений критериев, но и их вариативность,

асимметрию, взаимосвязи с другими критериями, а также информационную насыщенность.

Полученные весовые коэффициенты обладают устойчивостью к шуму в исходных данных и не зависят от субъективных предпочтений лица, принимающего решение, поскольку формируются автоматически на основе объективных свойств данных, что обеспечивает воспроизводимость результатов и повышает надёжность итоговых оценок в условиях ограниченного объёма обучающей выборки.



Источник: составлено автором.

Рисунок 11 – Схема определения весовых коэффициентов частных показателей на основе статистических характеристик экспертных оценок

Далее на основании данного метода будут рассчитываться весовые коэффициенты для обоих уровней агрегирования: на верхнем уровне

для определения весов частных показателей $H_{b,i}(t), E_{b,i}(t), L_{b,i}(t)$ в комплексном показателе готовности бригады в формулах (36), (47) и (53).

Таким образом, под адаптивной корректировкой весовых коэффициентов в работе понимается автоматизированный повторный расчет параметров Ridge-модели и весов при обновлении массива экспертных оценок и сведений о компетентности экспертов. В пределах одного цикла оперативного назначения значения весов фиксируются, что обеспечивает воспроизводимость расчета комплексного показателя готовности бригады.

3.5 Алгоритм формирования управленческого решения по параметрам оперативно-выездной бригады на основе динамической модели

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

Дифференциальные уравнения (20) обеспечивают прогнозирование траектории состояния каждой пары «бригада – инцидент» на горизонте от текущего момента принятия решения t_0 до фиксированного нормативного момента завершения аварийно-восстановительных работ момента t_i^{norm} . Величина τ_i задает задаёт горизонт прогноза от момента принятия решения до нормативного момента завершения ликвидации инцидента по формуле (67)

$$\tau_i = t_i^{norm} - t_0, \quad (67)$$

где t_i^{norm} – установленный нормативный момент завершения ликвидации инцидента i , при $t_0 < t_i^{norm}$.

Такой выбор горизонта обеспечивает сопоставимость всех альтернатив для одного инцидента и состояния всех допустимых пар прогнозируются к одному фиксированному нормативному моменту завершения работ.

В предлагаемом численном методе связь между прогнозным блоком и оптимизационным блоком осуществляет прогнозное значение комплексного показателя оперативной готовности бригады $\hat{G}_{b,i}(t_0 + \tau_i)$.

Следует отметить, что система дифференциальных уравнений (20) относится к классу линейных дифференциальных уравнений первого порядка и при заранее известных воздействиях допускает запись решения в явном виде. Однако численный метод должен обеспечивать единую вычислительную процедуру многократного прогнозирования всех допустимых пар при изменяющихся входных данных. Управляющие и деструктивные воздействия могут изменяться при поступлении новой информации и зависеть от решения диспетчера, состава, техники, маршрута и дорожной обстановки. Поэтому аналитическое решение используется для обоснования модели, а в вычислительном алгоритме применяется метод Рунге–Кутты четвертого порядка.

Выбор метода Рунге-Кутта четвертого порядка связан с необходимостью обеспечить достаточную точность прогноза при ограниченном числе шагов интегрирования. Для данного метода локальная погрешность одного шага имеет порядок $O((\Delta t)^5)$, а глобальная погрешность на конечном интервале интегрирования имеет порядок $O((\Delta t)^4)$.

Следовательно, уменьшение шага интегрирования Δt приводит к быстрому снижению накопленной ошибки, однако увеличивает вычислительные затраты, поскольку возрастает число шагов K и на каждом шаге требуется четыре вычисления правой части системы.

Пусть в момент t_0 задано множество доступных оперативно-выездных бригад $B_i^{adm}(t_0)$, 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

$s_{b,i}(t)$ (1). Динамика состояния пары «бригада – инцидент» описывается системой дифференциальных уравнений общего вида (20).

Для численного решения динамической части метода применяется классический метод Рунге-Кутты четвертого порядка по формуле (68)

$$t_k = t_0 + k\Delta t, \quad (68)$$

где k – индекс шага интегрирования, $k = \{0, 1, \dots, K\}$.

Для каждого инцидента i число шагов K и шаг интегрирования Δt выбираются таким образом, чтобы выполнялось $K\Delta t = \tau_i$. Далее при описании одной рассматриваемой пары (b, i) зависимость K и Δt от инцидента i в обозначениях опускается для компактности.

Состояние пары (b, i) на шаге k обозначается вектором $s_{b,i}^k$ по формуле (69)

$$s_{b,i}^k = s_{b,i}(t_k). \quad (69)$$

Переход от состояния $s_{b,i}^k$ к состоянию $s_{b,i}^{k+1}$ выполняется классическим методом Рунге–Кутты четвёртого порядка, этапы которого задаются формулами (70), (71), (72), (73) и (74)

$$k_1 = F_{b,i} \left(t_k, s_{b,i}^k, u_{b,i}(t_k), d_{b,i}(t_k) \right). \quad (70)$$

$$k_2 = F_{b,i} \left(t_k + \frac{\Delta t}{2}, s_{b,i}^k + \frac{\Delta t}{2} k_1, u_{b,i} \left(t_k + \frac{\Delta t}{2} \right), d_{b,i} \left(t_k + \frac{\Delta t}{2} \right) \right). \quad (71)$$

$$k_3 = F_{b,i} \left(t_k + \frac{\Delta t}{2}, s_{b,i}^k + \frac{\Delta t}{2} k_2, u_{b,i} \left(t_k + \frac{\Delta t}{2} \right), d_{b,i} \left(t_k + \frac{\Delta t}{2} \right) \right). \quad (72)$$

$$k_4 = F_{b,i} \left(t_k + \Delta t, s_{b,i}^k + \Delta t k_3, u_{b,i}(t_k + \Delta t), d_{b,i}(t_k + \Delta t) \right). \quad (73)$$

$$s_{b,i}^{k+1} = s_{b,i}^k + \frac{\Delta t}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad k = 0, 1, \dots, K-1, \quad (74)$$

где Δt - шаг интегрирования;

$F_{b,i}$ – функция системы дифференциальных уравнений (20).

С учётом нормировки частных показателей на интервал $[0,1]$ после вычисления очередного приближения осуществляется компонентная проекция полученного состояния на множество $[0,1]^3$. Проекция рассматривается как ограничивающий оператор численного метода и обеспечивает принадлежность вычисляемой траектории физически допустимому пространству нормированных состояний. На шагах, на которых проекция не активируется, применяются стандартные оценки локальной и глобальной погрешности метода Рунге–Кутты четвёртого порядка. При срабатывании проекции дополнительно контролируется допустимость состояния и при необходимости уменьшается шаг интегрирования.

Для контроля точности шага может использоваться правило Рунге. Для этого решение на очередном интервале сначала вычисляется с шагом Δt , а затем на том же интервале повторно вычисляется за два шага с шагом $\Delta t/2$. Если обозначить полученные значения через $s_{\Delta t}(t_{k+1})$ и $s_{\Delta t/2}(t_{k+1})$, то оценка погрешности решения с шагом $\Delta t/2$ определяется по формуле (75)

$$p_k \approx \frac{\left\| s_{\Delta t}(t_{k+1}) - \frac{s_{\Delta t}(t_{k+1}) + s_{\Delta t/2}(t_{k+1})}{2} \right\|}{2^4 - 1} = \frac{\left\| s_{\Delta t}(t_{k+1}) - \frac{s_{\Delta t}(t_{k+1}) + s_{\Delta t/2}(t_{k+1})}{2} \right\|}{15}. \quad (75)$$

Если $p_k > \varepsilon$, где ε – заданная допустимая погрешность, шаг Δt уменьшается и расчет повторяется. Если $p_k \ll \varepsilon$, шаг может быть увеличен для сокращения времени вычислений. В формуле (75)

для оценки погрешности используется равномерная норма вектора состояния, то есть максимальное по модулю отклонение среди компонент.

Дополнительно учитывается вопрос устойчивости численного решения. Для явных методов, включая классический метод Рунге-Кутты четвертого порядка, шаг интегрирования не должен быть чрезмерно большим. Для модельного линейного уравнения $y' = \lambda y$ устойчивость метода определяется функцией устойчивости по формуле (76)

$$R(z) = 1 + z + \frac{z^2}{2} + \frac{z^3}{6} + \frac{z^4}{24}, \quad z = \lambda \Delta t, \quad (76)$$

где λ – собственное значение линейной однородной части рассматриваемого уравнения.

Численная схема считается устойчивой для выбранного значения шага, если модуль функции устойчивости удовлетворяет условию (77)

$$|R(z)| \leq 1. \quad (77)$$

В рассматриваемой динамической модели естественная деградация частных показателей имеет вид $-\lambda_X X$, поэтому при выборе шага контролируется величина $z = -\lambda_X \Delta t$ для компонент H, E, L . Если шаг выбран слишком крупным, численное решение может исказить динамику показателей и привести к неверной проверке допустимости пары «бригада – инцидент». Поэтому шаг Δt выбирается с учетом точности по правилу Рунге и устойчивости вычислительной схемы.

Управляющее и деструктивное воздействия задаются линейными функциями времени по формулам (78) и (79)

$$u_{b,i}^X(t) = u_{b,i}^{X,0} + k_{b,i}^{u,X}(t - t_0), \quad (78)$$

где $u_{b,i}(t)$ – управляющее воздействие;

X – индекс подсистемы $X \in \{H, E, L\}$;

$u_{b,i}^{X,0}$ – начальное значение управляющего воздействия;

$k_{b,i}^{u,X}$ – интенсивности изменения управляющего воздействия.

$$d_{b,i}^X(t) = d_{b,i}^{X,0} + k_{b,i}^{d,X}(t - t_0), \quad (79)$$

где $d_{b,i}(t)$ – деструктивные воздействия;

X – индекс подсистемы $X \in \{H, E, L\}$;

$d_{b,i}^{X,0}$ – начальное значение деструктивного воздействия;

$k_{b,i}^{d,X}$ – интенсивности изменения влияния деструктивных факторов.

На каждом интервале прогноза управляющее и деструктивное воздействия аппроксимируются линейными функциями времени по формулам (78) и (79). Коэффициенты динамической системы (20), начальные уровни $u_{b,i}^{X,0}$, $d_{b,i}^{X,0}$ и интенсивности изменения $k_{b,i}^{u,X}$, $k_{b,i}^{d,X}$ идентифицируются по историческим данным для соответствующих типов ситуаций и могут обновляться при поступлении новой информации.

Такой способ задания позволяет учитывать нарастание положительных управляющих воздействий и отрицательных деструктивных факторов в пределах одного шага прогноза.

После каждого шага интегрирования проверяется принадлежность прогнозного состояния области допустимых состояний по условию (80)

$$s_{b,i}^k \in S_i^{adm}(t_k), \quad (80)$$

где $S_i^{adm}(t_k)$ – область допустимых состояний для выполнения работ по инциденту i в момент времени t_k .

Если условие (80) нарушается, то для данной пары формируется сигнал диспетчеру для корректировки: изменение состава, техники или маршрута. Если корректировка невозможна, пара исключается из дальнейшего рассмотрения при построении матрицы назначений.

После численного прогноза состояния по уравнению (70) – (74) для каждой пары «бригада – инцидент» рассчитывается прогнозное значение $\hat{G}_{b,i}$. Из полученных значений формируется матрица прогнозной готовности строится матрица $\hat{G} = [\hat{G}_{b,i}]_{m \times n}$, где $m = |B(t_0)|$, $n = |I(t_0)|$.

Далее матрица прогнозной готовности используется при построении оптимизационной постановки задачи назначения.

По результатам проведённого анализа способов решения задачи распределения оперативно-выездных бригад 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 при одновременном обеспечении точности выбора назначения на основе рассчитанных значений комплексного показателя готовности.

Введём матрицу бинарных переменных $X = [x_{b,i}]_{m \times n}$, 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 суммы прогнозных значений комплексного показателя оперативной готовности бригад, рассчитанных к нормативному моменту ликвидации каждого соответствующего инцидента. Целевая функция описывается формулой (81)

$$J(\hat{G}, X) = \sum_{i \in I(t_0)} \sum_{b \in B_i^{adm}(t_0)} \hat{G}_{b,i} x_{b,i} \rightarrow \max, \quad (81)$$

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 (82)

$$\gamma_{b,i} = \begin{cases} 1 - \hat{G}_{b,i}, & b \in B_i^{adm} \\ M_{pen}, & b \notin B_i^{adm} \end{cases} \quad (82)$$

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.

Штраф выбирается из условия $M_{pen} > N c_{max}$,

где $c_{max} = \max_{i, b \in B_i^{adm}} (1 - \hat{G}_{b,i}) \leq 1$. В частности, достаточно принять $M_{pen} > N$.

Тогда при существовании полного допустимого назначения решение, содержащее запрещённую пару, не может быть оптимальным.

Для применения классической квадратной схемы матрица Γ дополняется до размера $N \times N$, где $N = \max\{m, n\}$. Если $m > n$, вводятся фиктивные инциденты с нулевой стоимостью, обозначающие неиспользованные бригады. Если $n > m$, вводятся фиктивные бригады со штрафом M_{pen} за неназначенный инцидент. Полученную квадратную матрицу обозначим $\bar{\Gamma} = [\bar{\gamma}_{b,i}]_{N \times N}$.

После дополнения матрицы затрат до квадратного вида $\bar{\Gamma}$ оптимальная матрица назначений определяется минимизацией суммарной стоимости по формуле (83)

$$X^* = \underset{X}{\operatorname{argmin}} \sum_{b=1}^N \sum_{i=1}^N \bar{\gamma}_{b,i} x_{b,i}. \quad (83)$$

Взаимно однозначный характер назначения в дополненной квадратной постановке обеспечивается ограничениями: каждой строке и каждому столбцу соответствует ровно одно назначение, включая фиктивные элементы, по системе условий (84)

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N x_{b,i} = 1, & b = 1, \dots, N \\ \sum_{b=1}^N x_{b,i} = 1, & i = 1, \dots, N. \\ x_{b,i} \in \{0,1\}, & b, i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (84)$$

Далее выполняются стандартные шаги венгерского алгоритма над матрицей.

Шаг 1. Выполняется редукция по строкам. Для каждой строки r из всех элементов строки вычитается минимальный элемент этой строки по формуле (85)

$$\gamma'_{b,i} = \bar{\gamma}_{b,i} - \min_{1 \leq j \leq N} \bar{\gamma}_{b,j}, \quad b, i = 1, \dots, N, \quad (85)$$

где $\gamma'_{b,i}$ – элемент матрицы затрат после редукции по строкам;

j – индекс столбца, по которому определяется минимум в строке b .

Шаг 2. Выполняется редукция по столбцам. Для каждого столбца j из всех элементов столбца вычитается минимальный элемент этого столбца по формуле (86)

$$\gamma''_{b,i} = \gamma'_{b,i} - \min_{1 \leq r \leq N} \gamma'_{r,i}, \quad b, i = 1, \dots, N, \quad (86)$$

где $\gamma''_{b,i}$ – элемент матрицы затрат после редукции по столбцам;

r – индекс строки, по которому определяется минимум в столбце i .

Шаг 3. Среди нулевых элементов редуцированной матрицы ищется максимальный набор независимых нулей: не более одного выбранного нуля в каждой строке и не более одного – в каждом столбце. Если найдено N независимых нулей, они задают оптимальное назначение.

Шаг 4. Если N независимых нулей не найдено, все нулевые элементы покрываются минимальным числом строк и столбцов. Если число покрывающих линий меньше N , выполняется дополнительная корректировка матрицы.

Шаг 5. Среди элементов, не покрытых строками и столбцами, выбирается минимальный элемент по формуле (87)

$$\delta = \min_{b \notin R_{cov}, i \notin C_{cov}} \gamma''_{b,i}, \quad (87)$$

где δ – минимальный непокрытый элемент;

R_{cov} – множество покрытых строк;

C_{cov} – множество покрытых столбцов.

Затем выполняется корректировка матрицы по формуле (88)

$$\gamma'''_{b,i} = \begin{cases} \gamma''_{b,i} - \delta, & b \notin R_{cov}, i \notin C_{cov} \\ \gamma''_{b,i} + \delta, & b \in R_{cov}, i \in C_{cov}, \\ \gamma''_{b,i}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (88)$$

где $\gamma'''_{b,i}$ – элемент скорректированной матрицы.

После корректировки шаги 3-5 повторяются до получения N независимых нулей.

Шаг 6. По найденному набору из N независимых нулей формируется матрица X^* . Фиктивные назначения исключаются. Если в решении выбрана реальная запрещённая пара со стоимостью M_{pen} либо фиктивная бригада

назначена на реальный инцидент, полного допустимого назначения для текущего состава исходных данных не существует.

Результатом алгоритма является набор назначений X^* , обеспечивающий минимум суммарных прогнозных затрат и, в силу (80), (81) и (82), максимизирующий сумму прогнозных значений готовности при соблюдении нормативных, ресурсных, кадровых, технических и логистических ограничений. Для матрицы размера $N \times N$ вычислительная сложность венгерского алгоритма составляет $O(N^3)$.

Динамический характер работы алгоритма обеспечивается тем, что описанная процедура выполняется не однократно, а при каждом существенном изменении оперативной обстановки. При поступлении новых данных могут изменяться состояние бригад, параметры инцидентов, дорожная обстановка, наличие техники, функциональное состояние персонала и множество допустимых управляющих воздействий. Иными словами, назначение, оптимальное в момент t_0 , может перестать быть оптимальным при изменении оперативной обстановки.

Выводы к главе 3

В третьей главе разработан и алгоритмически реализован численный метод управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании на основе динамики комплексного показателя оперативной готовности ОВБ, рассматривающий назначение и корректировку параметров ОВБ (состав, оснащение, маршрут следования) как динамический процесс управления во времени, а не как разовое диспетчерское решение.

Предложенный метод отличается от традиционных подходов к диспетчеризации и регламентному выбору бригад тем, что:

- формируется временно и семантически согласованный слой признаков для каждого момента принятия управленческого решения, при котором используются только данные, доступные системе на момент t ;

– вычисление частных показателей подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика» выполняется на основе сформированного признакового слоя с применением устойчивых преобразований, нормировки и мультипликативного агрегирования компонент совместно с ограничительными множителями, исключающими компенсацию критически недопустимого значения одной компоненты высокими значениями остальных;

– реализован метод автоматизированного и адаптивно обновляемого определения весовых коэффициентов частных показателей на основе статистического анализа агрегированных экспертных оценок и Ridge-регрессии, обеспечивающий воспроизводимость и устойчивость оценок при ограниченном объёме исходных данных;

– формирование управленческого решения реализовано как задача о назначениях на основе прогностического комплексного показателя готовности бригад, рассчитанного для всех допустимых пар к нормативному времени ликвидации соответствующего инцидента.

Глава 4

Оценка эффективности численного метода решения задачи управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании

Для подтверждения эффективности численного метода управления ОВБ, представленного в третьей главе диссертации, был проведён вычислительный эксперимент, направленный на оценку оперативности назначения бригады для ликвидации аварий. Эффективность предложенного научно-методического аппарата определялась на основе анализа метрик качества, характеризующих результативность управления ОВБ в условиях проведения аварийно-восстановительных работ.

Выбор показателей эффективности был обусловлен практическими требованиями к системам управления ОВБ [72]. По результатам проведенных исследований были выбраны следующие показатели качества:

- среднее полное время ликвидации аварии;
- среднее время прибытия бригады к месту аварии;
- доля заявок, по которым выполнен SLA по времени прибытия;
- доля заявок, по которым выполнен SLA по полному времени ликвидации аварии;
- SAIDI (System Average Interruption Duration Index), характеризующий среднюю продолжительность отключений электроснабжения у потребителей.

Указанный показатель SAIDI (System Average Interruption Duration Index) при проведении исследований рассчитывался согласно Приказу Министерства энергетики Российской Федерации от 29 ноября 2016 г. № 1256 «Об утверждении Методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций» по формуле (89)

$$SAIDI = \frac{\sum N_i r_i}{N_t}, \quad (89)$$

где N_i – количество потребителей, затронутых i -й аварией;

r_i – продолжительность перерыва в часах;

N_t – общее количество потребителей.

Оценка указанных показателей основана на парном сравнении двух методов назначения бригад на идентичных исходных данных. С этой целью разработан комплекс программ, имитирующий работу модели, который формирует единый поток аварийных событий с фиксированным начальным состоянием генератора псевдослучайных чисел, что обеспечивает одинаковую последовательность возникновения аварий, их категорий, параметров внешней среды и условий выполнения работ для обоих сопоставляемых методов. Далее на одном и том же наборе аварийных ситуаций последовательно выполняются две серии моделирования: в первой серии назначения оперативно-выездных бригад осуществляются на основе базового подхода, во второй с использованием разработанного численного метода, основанного на расчёте комплексного показателя оперативной готовности бригады. Такой способ планирования эксперимента позволяет исключить влияние случайных факторов на различия в результатах и обеспечить сопоставимость полученных оценок.

4.1 Описание вычислительного эксперимента по проверке эффективности численного метода расчёта параметров оперативно-выездных бригад электросетевой компании на основе динамической эргатической модели управления оперативно-выездными бригадами при назначении на ликвидацию аварии

Для подтверждения эффективности предложенного в третьей главе численного метода расчёта параметров оперативно-выездных бригад

электросетевой компании был проведен вычислительный эксперимент, состоящий из двух этапов, оценивающих определяющие операции метода:

- проверки эффективности метода определения весовых коэффициентов для учёта важности частных показателей метода назначения ОВБ на ликвидацию аварийно-восстановительных работ;
- проверки эффективности применения численного метода управления ОВБ при направлении на ликвидацию АВР.

Такой подход к постановке эксперимента позволяет последовательно оценить как точность оценки готовности бригады, так и результативность её практического использования при принятии диспетчерских решений.

В качестве исходных данных для проведения эксперимента были использованы сведения о бригадах и сотрудниках электросетевой компании АО «ОБЛКОММУНЭНЕРГО», дополненные параметрами, необходимыми для реализации моделирования. Использованный массив данных включает информацию о 25 оперативно-выездных бригадах общей численностью 205 сотрудников, а также характеристики каждого члена бригады.

Для получения сопоставимых результатов для каждого метода использовались одинаковые потоки аварийных событий. Эксперимент включал 20 независимых эпизодов, в каждом из которых моделировалось по 6 аварийных заявок, то есть суммарно было воспроизведено 120 аварий. Временные интервалы между поступлением заявок задавались случайной величиной с экспоненциальным распределением со средним значением 40 мин. и минимальным шагом 5 мин. Всего использовано заявок по 44 авариям, 42 инцидентам I категории и 34 инцидентам II категории. Подразделение на аварии и инциденты проведено согласно Приказу Минэнерго России от 30.09.2025 № 1214 и зависит от объема аварийного отключения основного генерирующего оборудования. Так, аварии – самый серьезный уровень, прекращение электроснабжения потребителей суммарной мощностью 100 МВт и более. Инцидент I категории – серьезное нарушение электроснабжения, мощностью менее 100 МВт. Инцидент II категории – все остальные, менее серьезные технологические нарушения, не подпадающие под первые две категории.

В части нормативного численного состава бригад и количества техники были приняты данные [46], отраженные в таблице 2.

Таблица 2 – Численный нормативный состав ОВБ и количество техники по категориям аварий

Категория	Состав бригады, чел.	Количество техники, ед.	Время устранения, часов
Авария	25	5	$3,3 \pm 0,2$
	21	5	$3,8 \pm 0,2$
	17	4	$4,3 \pm 0,2$
I	15	3	$2,6 \pm 0,2$
	13	3	$2,9 \pm 0,2$
	10	2	$3,2 \pm 0,2$
II	7	2	$1,4 \pm 0,2$
	5	1	$1,7 \pm 0,2$
	3	1	$2,0 \pm 0,2$

Источник: составлено автором на основе материалов [46].

Для оценки эффективности методов использовались следующие метрики оценки качества работы: среднее полное время ликвидации аварии, штрафное время ликвидации с учётом необработанных заявок, доля обработанных заявок, доля допустимых назначений, а также показатели выполнения SLA по прибытии и по полному завершению аварийно-восстановительных работ.

Для каждой аварии i введём следующие обозначения:

$G_{b,i}(t)$ – значение комплексного показателя оперативной готовности для пары «бригада – авария», выбранной для i -й заявки;

$t_i^{(a)}$ – момент назначения бригады;

$t_i^{(arr)}$ – момент прибытия бригады к месту аварии;

$S_i^{(arr)}$ – норматив SLA по времени прибытия;

N_i – количество потребителей, затронутых i -й аварией;

$\tau_i^{(norm)}$ – нормативное время устранения аварии для соответствующей категории;

N_t – общее количество потребителей в рассматриваемой системе;

M – количество заявок, для которых в рассматриваемом сценарии было сформировано назначение.

Среднее значение комплексного показателя оперативной готовности для назначенных пар «ОВБ – авария» рассчитывается по формуле (90)

$$\bar{G} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M G_{b,i}(t). \quad (90)$$

Среднее время прибытия бригады к месту аварии определяется по формуле (91)

$$\overline{ETA} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M t_i^{(arr)} - t_i^{(a)}. \quad (91)$$

Для оценки соблюдения нормативов по времени прибытия вводился бинарный показатель выполнения SLA по доезду бригады по формуле (92)

$$z_i^{(arr)} = \begin{cases} 1, & \eta_i \leq S_i^{(arr)} \\ 0, & \eta_i > S_i^{(arr)} \end{cases}, \quad (92)$$

где $\eta_i = t_i^{(arr)} - t_i^{(a)}$ – время прибытия бригады к месту аварии.

Из уравнения определим долю заявок, по которым выполнен SLA, по формуле (93)

$$R_{SLA-arr} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M z_i^{(arr)}. \quad (93)$$

Оценка на основании данных метрик основана на парном сравнении назначения бригад на идентичных исходных данных с использованием разработанного численного метода и нормативным назначением диспетчером. С этой целью в имитационной модели формируется единый поток аварийных событий с фиксированным начальным состоянием генератора псевдослучайных чисел, что обеспечивает одинаковую последовательность возникновения аварий,

их категорий, параметров внешней среды и условий выполнения работ для обоих сопоставляемых методов.

4.2 Вычислительный эксперимент по оценке определения весовых коэффициентов частных показателей в рамках численного метода

Первый этап вычислительного эксперимента направлен на оценку разработанного метода по расчёту весовых коэффициентов частных показателей, используемых при формировании комплексного показателя оперативной готовности бригад. В рамках предложенного численного метода указанные коэффициенты обеспечивают количественный учёт относительной значимости частных показателей подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика» при интеграции разнородных характеристик в единый критерий, применяемый для ранжирования альтернатив назначения оперативно-выездных бригад.

Целью данного эксперимента является оценка точности и эффективности при принятии решений автоматизированного определения весовых коэффициентов без непосредственного привлечения эксперта для определения весов альтернатив. Необходимо проверить эффективность использования методов машинного обучения и БЯМ, учитывающих не только значения экспертных оценок, но и характеристики компетентности экспертов, для расчёта весов частных показателей и точность расчёта по сравнению с традиционными аналитическими способами назначения весов критериев с помощью экспертной информации от ЛПР.

В качестве исходных данных использовались сформированные с использованием БЯМ (gpt-4o-mini) задачи по предметным областям и альтернативам, а также профили экспертов, различающихся по уровню компетентности, профессиональному опыту и характеру предпочтений при оценке критериев [97; 106].

Всего сформировано 25 задач по 4 альтернативы в каждой. Параметры JSON-конфигурации для формирования задач по предметным областям, представлены на рисунке 12.

```

"meta": {
  "n_tasks": 25,
  "model": "gpt-4o-mini",
  "temperature": 0.7,
  "domains_used": [
    "Выбор поставщика облачных услуг",
    "Выбор облачной DWH/BI платформы",
    "Выбор языка программирования для нового проекта",
    "Выбор CRM-системы"
  ]
},

```

Источник: составлено автором.

Рисунок 12 – Фрагмент JSON-конфигурации для формирования задач по предметным областям

Также были сформированы профили экспертов, отражающие различия в уровне компетентности, профессиональном опыте и характере предпочтений при оценке критериев. Пример JSON-структуры профиля эксперта приведён на рисунке 13. Такой способ построения исходных данных позволяет рассматривать процесс определения весов в условиях, приближённых к реальной задаче, когда оценки формируются на основе неоднородных экспертных представлений.

```

"expert": {
  "id": "task_0003",
  "name": "Анна Смирнова",
  "role": "Консультант по облачным технологиям",
  "years_exp": 10,
  "competence": 0.9,
  "style": "Стратегический",
  "background": "Консультирует компании по выбору и внедрению облачных решений."
},

```

Источник: составлено автором.

Рисунок 13 – Пример JSON-структуры профиля эксперта

Для расчёта весовых коэффициентов использован подход, учитывающий уровень компетентности эксперта. Это обусловлено тем, что в практических условиях мнения экспертов обладают различной степенью достоверности и не могут рассматриваться как равнозначные (94)

$$w_j = \sum_{e=1}^k \left(\frac{competence_e}{\sum competence_e} w_{e,j} \right), \quad (94)$$

где w_j – итоговый вес j -го критерия;

k – число экспертов;

e – индекс эксперта;

$competence_e$ – коэффициент компетентности e -го эксперта;

$w_{e,j}$ – вес j -го критерия, назначенный e -м экспертом;

$\sum competence_e$ – суммарная компетентность всех экспертов.

Отношение $\frac{competence_e}{\sum competence_e}$ задаёт нормированный вклад эксперта в итоговую агрегированную оценку.

В настоящем исследовании для проведения вычислительного эксперимента принимается допущение о существовании референсного вектора весовых коэффициентов, задающего согласованную модельную структуру относительной значимости критериев. Такой вектор получен с использованием модели-критика (gpt-5) и используется как единый референс для обучения и сопоставления рассматриваемых методов восстановления весов. Референсный вектор не трактуется как истинная структура предпочтений реальных экспертов. Данное допущение позволяет оценить, насколько точно различные методы способны воспроизводить структуру весов, которая далее используется при расчёте комплексного показателя оперативной готовности бригады.

Схема эксперимента состоит в следующем. Для каждого набора исходных данных выполняется восстановление вектора весовых коэффициентов несколькими способами, включая модели машинного обучения и аналитические методы агрегирования экспертных оценок. На вход каждому методу подаются идентичные наборы задач и экспертных характеристик, а на выходе формируется оценка весов частных показателей. Далее полученные результаты сопоставляются с эталонным вектором, что позволяет количественно определить точность восстановления структуры значимости критериев и, тем самым, оценить пригодность соответствующего метода для применения в составе разработанного численного метода управления ОБ.

Для оценки качества восстановления весов используется метрика MSE [135], которая измеряет, насколько точно метод восстанавливает веса (95)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (95)$$

где n – количество наблюдений;

y_i – фактическое значение для i -го наблюдения;

$\hat{y}_i$ – предсказанное значение для i -го наблюдения.

Выбор данной метрики обусловлен тем, что она позволяет количественно оценить ошибку восстановления весов и, следовательно, определить, может ли автоматизированный подход обеспечить точность, достаточную для применения в составе численного метода. Таким образом, оценка на данном этапе относится именно к задаче восстановления структуры весовых коэффициентов, от которой зависит корректность расчёта комплексного показателя оперативной готовности бригады. При этом с точки зрения общей логики данный этап трактуется не как автономная задача подбора весов, а как этап проверки качества расчета комплексного показателя готовности бригады $G_{b,i}(t)$, от которого далее зависит качество решения о назначении бригады.

В таблице 3 представлены результаты обучения четырех моделей машинного обучения для определения весов.

Таблица 3 – Метрики определения весов с помощью ML-моделей

Модель	MSE_cv	MSE_test
Ridge	0,00780	0,00370
Lasso	0,00819	0,00405
RandomForest	0,00953	0,00384
GradientBoosting	0,01100	0,00457

Источник: составлено автором.

Как показывают результаты, представленные в таблице 3, наименьшее значение ошибки на тестовой выборке демонстрирует модель Ridge. Это позволяет сделать вывод о том, что именно данная модель наиболее точно восстанавливает эталонные веса критериев и, следовательно, является предпочтительной для применения в разработанном численном методе. Данное наблюдение также интерпретируется следующим образом, более точное восстановление весов повышает корректность вычисления комплексного показателя оперативной готовности ОВБ, а значит, повышает качество ранжирования альтернатив назначения бригад и формируемой далее матрицы стоимости алгоритма оптимизации.

В таблице 4 представлены результаты эксперимента, в рамках которого качество восстановления весов сравнивается с результатами известных аналитических методов. Такое сравнение необходимо для того, чтобы показать преимущество предложенного подхода не только по отношению к другим моделям машинного обучения, но и по отношению к традиционным способам определения весов критериев.

Таблица 4 – Сравнение качества восстановления весов различными способами определения весовых коэффициентов

Метод	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.

Для расширенной оценки использованы метрики, определяемые формулами (96) и (97)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (96)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|}, \quad (97)$$

где n – количество наблюдений в выборке;

y_i – фактическое значение оцениваемого показателя;

$\hat{y}_i$ – значение оцениваемого показателя для i -го наблюдения, полученное с использованием рассматриваемого метода.

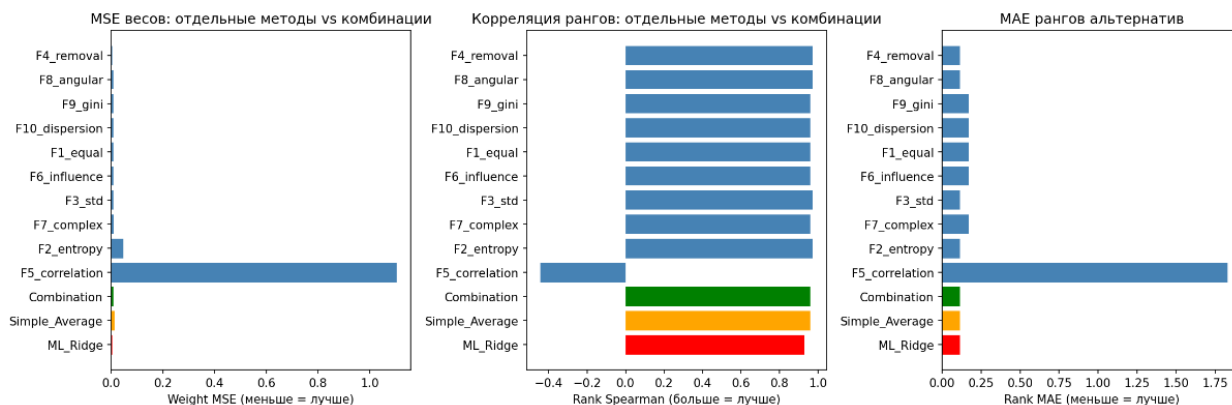
Использование нескольких метрик позволяет оценить не только абсолютную величину ошибки, но и устойчивость сохранения порядкозначимости критериев, так как в системе поддержки принятия решений требуется не просто определить численные значения весов, но и корректно воспроизвести ранговую структуру критериев, влияющую на итоговый выбор альтернатив назначения бригады.

Анализ результатов экспериментов, представленных в таблице 3, показывает, что применение современных методов машинного обучения (Ridge) обеспечивает наилучшую точность восстановления весовых коэффициентов. 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%. 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.

Это означает, что разработанный метод определения весов позволяет более точно описать относительную значимость частных показателей и тем самым повысить достоверность расчёта комплексного показателя оперативной готовности бригады. Полученное различие статистически значимо (p -value = 0,0016), что подтверждает устойчивый характер выявленного преимущества.

Также на рисунке 14 построен график для визуального сравнения всех методов.

Результаты эксперимента на рисунке 14, график 1 показывают, что использование отдельных аналитических критериев приводит к высокой ошибке восстановления весов.

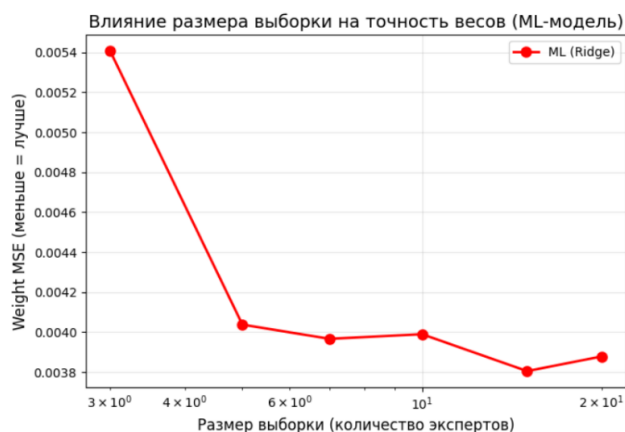


Источник: составлено автором.

Рисунок 14 – Сравнение методов определения весов критериев

При этом, наилучшее качество достигается при использовании ML-подхода, который объединяет несколько статистических характеристик критериев одновременно. Отметим, что минимальное значение MAE рангов у ML-подхода на рисунке 14, график 3 свидетельствует о его практическом преимуществе при выборе альтернатив, особенно в задачах топ-k отбора.

Дополнительно проведен эксперимент с целью определения влияния размера исходной выборки на точность расчета весов моделью, представленный на рисунке 15 для возможности привлечения минимально эффективного числа экспертов.



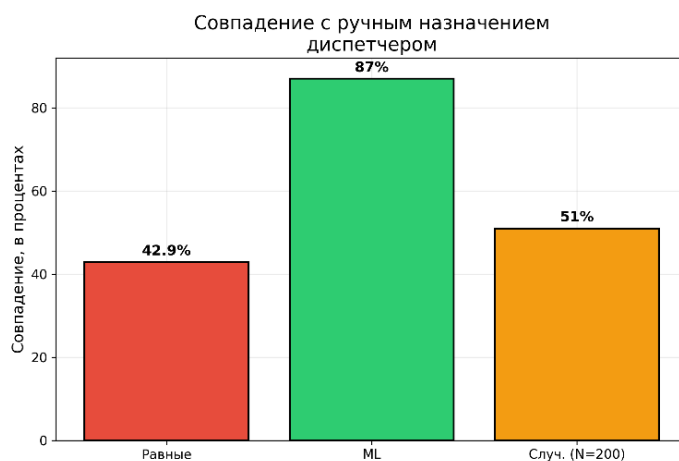
Источник: составлено автором.

Рисунок 15 – Влияние размера выборки на точность восстановления весов

График на рисунке 15 показывает, что с увеличением объема обучающей выборки точность определения весовых коэффициентов частных показателей возрастает (значение MSE снижается). Это свидетельствует о том, что применение подхода на основе машинного обучения обеспечивает устойчивое восстановление весов при расширении массива экспертных данных. Для разработанного численного метода данный результат имеет не только самостоятельное значение на этапе настройки комплексного показателя оперативной готовности бригады, но и прикладное значение с точки зрения оперативного управления. Повышение точности весовых коэффициентов позволяет более обоснованно ранжировать альтернативы назначения ОВБ, а следовательно, повышает достоверность выбора состава, оснащения и маршрута следования бригады при ликвидации аварии.

Таким образом, в рамках сформированной синтетической выборки предложенный подход на основе Ridge-регрессии демонстрирует меньшие значения ошибок MSE и MAE по сравнению с рассмотренными традиционными способами определения весов. Полученный результат подтверждает целесообразность использования Ridge-регрессии для автоматизированного воспроизведения заданной структуры значимости критериев в составе численного метода. При этом вывод относится к воспроизведению референсной структуры весов; практическое влияние способа определения весов на решение задачи назначения оценивается далее отдельно.

Результаты проведенного эксперимента на имитационной модели приведены на рисунке 16. Показано влияние способа задания весовых коэффициентов на совпадение назначений с ручным выбором диспетчером. Установлено, что рассматриваемые варианты весов существенно различаются по степени согласованности с фактическими решениями диспетчера: доля совпадений составляет 42,9%, 87% и 51% соответственно.



Источник: составлено автором.

Рисунок 16 – Влияние способа определения весов на ранжирование альтернатив
«ОВБ – авария»

Наилучший результат обеспечивает вариант, в котором веса назначаются с помощью ML модели, что свидетельствует о высокой чувствительности процедуры назначения к структуре весовых коэффициентов. Следовательно, корректное определение весов частных показателей обеспечит оценку влияния критериев, а соответственно и численного метода в целом и должно рассматриваться как значимый фактор качества численного метода управления бригадами.

4.3 Оценка эффективности численного метода решения задачи оперативного управления параметрами оперативно-выездных бригад

Второй этап вычислительного эксперимента направлен на оценку эффективности разработанного численного метода управления оперативно-выездными бригадами. На предыдущем этапе была подтверждена возможность более точного определения весовых коэффициентов частных показателей подсистем «Человек», «Техника» и «Логистика», которые будут использованы на данном этапе для расчёта комплексного показателя оперативной готовности бригады и оценки качества итоговых решений о назначении ОВБ на ликвидацию аварии.

Оценка эффективности разработанного численного метода проводилась в сравнении с существующим нормативным назначением диспетчером ОВБ

на аварию. Сопоставление указанных подходов позволяет оценить, обеспечивает ли предложенный метод повышение оперативности принятия решений по сравнению с традиционной схемой диспетчерского управления.

В таблице 5 представлен сравнительный анализ результатов моделирования.

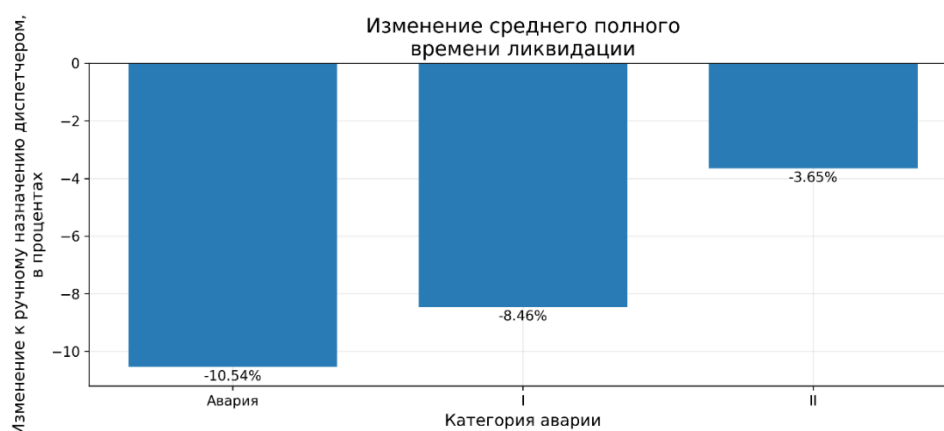
Таблица 5 – Сравнительный анализ результатов моделирования

Метрика	Ручное назначение	Численный метод	Δ (процент)
Среднее полное время ликвидации 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.

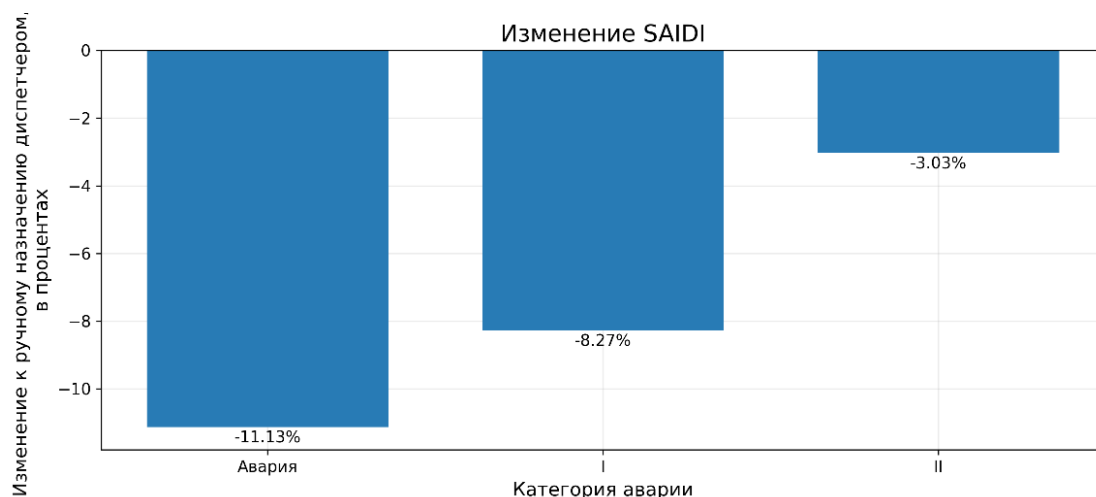
По результатам моделирования установлено, что при использовании разработанного численного метода среднее полное время ликвидации аварии уменьшается с 189,47 до 172,35 мин., что соответствует улучшению на 9,03% по всем категориям аварий.

Влияние использования численного метода при рассмотрении по категориям аварии представлено на рисунках 17, 18. На рисунках видно, что наибольшее снижение среднего полного времени ликвидации аварии приходится на аварии и составляет -10,54%. Данный факт свидетельствует о том, что численный метод эффективен при назначении на наиболее сложные аварийные ситуации.



Источник: составлено автором.

Рисунок 17 – Изменение среднего времени ликвидации аварии в зависимости от категории аварии



Источник: составлено автором.

Рисунок 18 – Изменение SAIDI в зависимости от категории аварии

Дополнительно было установлено улучшение по нормативным показателям качества обслуживания. Доля заявок с выполнением SLA по времени прибытия увеличилась с 0,86 до 1,00, а доля заявок с выполнением SLA по полному времени ликвидации аварии возросла с 0,75 до 0,86. Приведённые в таблице 5 значения округлены, а относительный прирост по исходным значениям составляет 16,28% и 14,67% соответственно. Индекс SAIDI сократился с 2759,77 до 2614,88 мин./потребитель, то есть на 5,25%. В рамках одинакового модельного потока аварийных событий это соответствует уменьшению совокупной длительности перерывов электроснабжения.

В ходе эксперимента было сформировано 500 бутстрап-выборок, для каждой из которых повторно вычислялись значения рассматриваемых метрик качества. Во всех бутстрап-реализациях направление эффекта сохранялось: численный метод обеспечивал меньшую среднюю продолжительность отключений и более быстрое прибытие бригады к месту аварии. Проверка различий с помощью t -критерия Стьюдента ($t = -10,084$) и критерия Уилкоксона ($W = 253,0$) показала статистическую значимость различий на уровне $p < 0,001$. Таким образом, нулевая гипотеза об отсутствии систематических различий между результатами нормативного и разработанного численного методов назначения ОБВ отвергается.

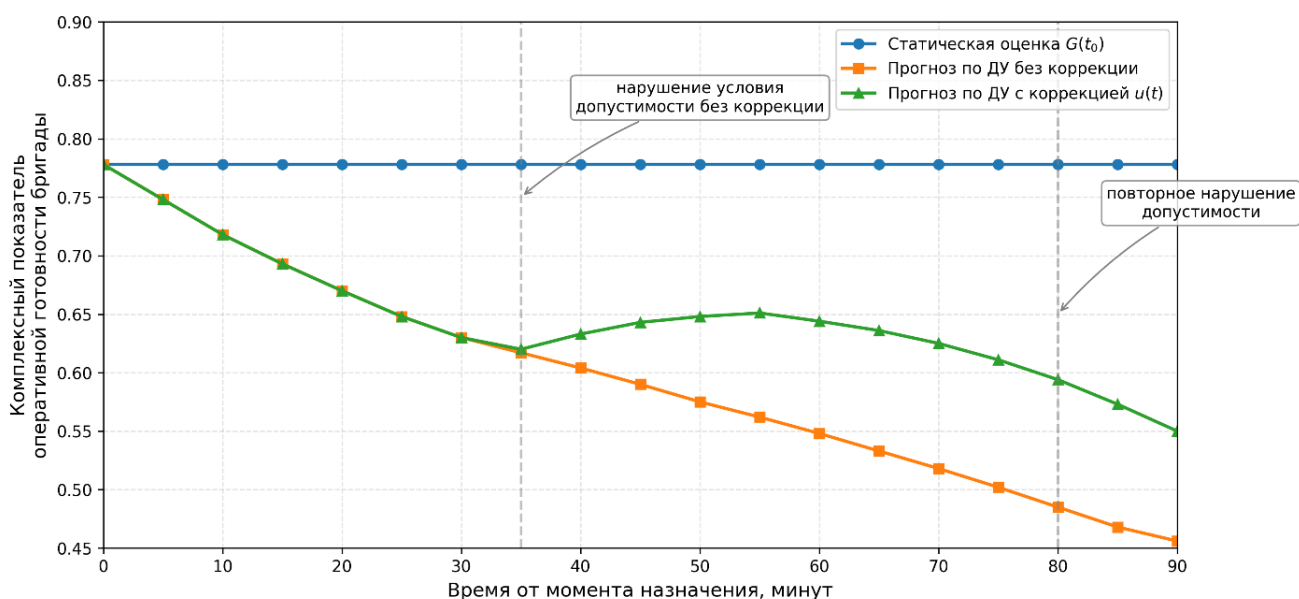
Для того чтобы показать, что полученное улучшение связано с учетом изменения состояния системы во времени проведен динамический численный эксперимент. Его цель состоит в сравнении трех режимов расчета: статичной оценки комплексного показателя в начальный момент времени, прогноза изменения комплексного показателя по дифференциальной модели без корректирующих воздействий и прогноза по той же модели с учетом управляющей коррекции.

В эксперименте для каждой пары «бригада – авария» состояние рассматривается как вектор частных показателей (1) дискретной временной сетке расчет траектории выполняется методом Рунге-Кутты.

После вычисления прогнозного состояния рассчитывается комплексный показатель оперативной готовности.

Именно значения комплексного показателя, полученные на текущем шаге или на заданном горизонте прогноза для каждой пары «бригада – авария», передаются далее в блок оптимального назначения.

Результат моделирования динамики комплексного показателя для одной пары «ОВБ – авария» приведен на рисунке 19.

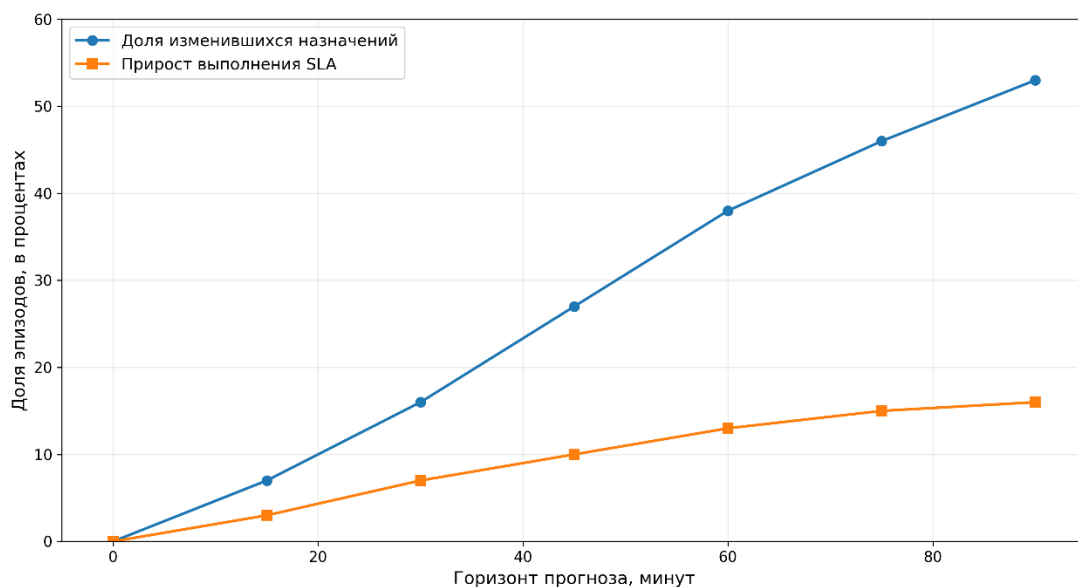


Источник: составлено автором.

Рисунок 19 – Сравнение статичной оценки и динамического прогноза комплексного показателя оперативной готовности

Как видно из рисунка 19, 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. Тем самым динамическая модель используется не только для ранжирования бригад, но и для выявления момента, когда требуется корректировка состава, оснащения или маршрута.

Для оценки влияния горизонта динамического прогноза на итоговое назначение был проведен дополнительный расчет, в котором сравнивались назначения, полученные по статичной матрице комплексного показателя, и назначения, полученные по прогнозной матрице при различных значениях горизонта τ . Результаты приведены на рисунке 20.



Источник: составлено автором.

Рисунок 20 – Влияние горизонта динамического прогноза на изменение назначений и выполнение SLA

Рисунок 20 показывает, что с увеличением горизонта прогноза возрастает доля назначений, отличающихся от статичного решения. В модельном эксперименте при горизонте 90 минут она достигает 53%. Одновременно увеличивается прирост выполнения SLA. Это означает,

что учет динамики влияет не только на численное значение комплексного показателя, но и на само управленческое решение, формируемое венгерским алгоритмом. Следовательно, статичный показатель, рассчитанный в начальный момент времени, может быть достаточен только для краткосрочного выбора при неизменной обстановке, тогда как при изменении состояния персонала, техники, логистики и внешних условий требуется прогнозная динамическая оценка комплексного показателя во времени.

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 ($N = 500$).

При сопоставлении с ручным диспетчерским назначением в таблице 6 в качестве базового использовались нормативные показатели диспетчеризации в системах оперативного реагирования [6; 75], которые составляют ~2 мин.

Таблица 6 – Сравнение вычислительной оперативности методов назначения ОББ

Подход	Показатель	Значение
Нормативное назначение диспетчером	Средний показатель по статистике	~ 60 - 120 с.
Назначение диспетчером с использованием АСДУ	Средний показатель по статистике	~ 121 с.
Численный метод	Среднее время вычисления	$11,15 \pm 1,68$ мс.

Источник: составлено автором.

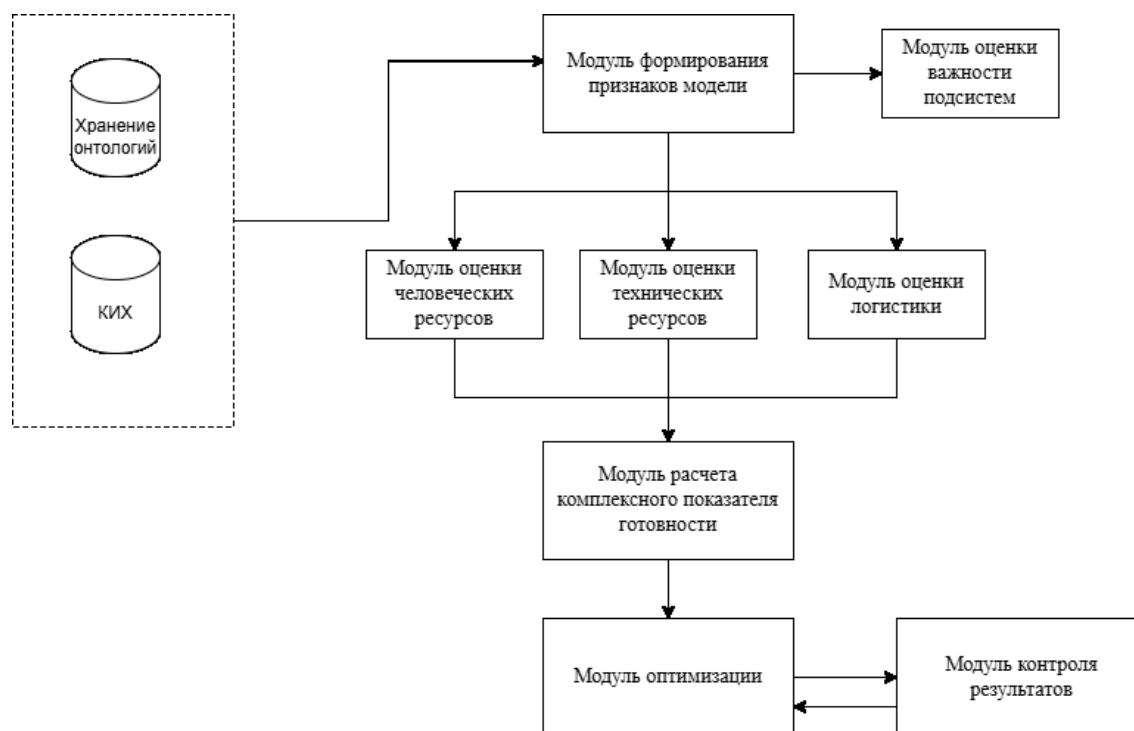
Полученные результаты, представленные в таблице 6, показывают, что разработанный численный метод позволяет получить результат назначения за миллисекунды по времени выполнения на всем диапазоне размеров задачи. Таким образом, вычислительный эксперимент подтверждает, что предложенный численный метод обладает достаточной вычислительной оперативностью для практического применения. При стандартном времени человеко-машинного диспетчерского решения порядка десятков секунд или около двух минут автоматизированный расчёт выполняется за миллисекунды, то есть существенно

быстрее времени, необходимого ЛПР на анализ ситуации и взаимодействие с АСДУ.

Общие полученные результаты по итогам экспериментов интерпретируются следующим образом: снижение среднего времени устранения аварии и рост доли выполнения SLA являются следствием не только более быстрого выезда бригады, а более качественного выбора назначения на этапе принятия диспетчерского решения. Иными словами, эффективность численного метода проявляется уже в момент назначения ОББ, а затем отражается в улучшение итоговых производственных показателей.

4.4 Практические рекомендации по созданию комплекса программ оперативного управления оперативно-выездными бригадами при назначении на ликвидацию аварии

Рекомендуемая архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решения, реализующей метод управления ОББ, приведена на рисунке 21.



Источник: составлено автором.

Рисунок 21 – Архитектура перспективной ИСППР для управления ОББ электросетевой компании

На основе разработанного численного метода разработана универсальная архитектура ИСППР, позволяющая достичь регламентированного времени ликвидации аварии. Проведенные исследования показали, что данная архитектура может быть использована как база для перспективных разработок в сфере интеллектуальных систем принятия решения для снижения когнитивной нагрузки диспетчера.

ИСППР должна включать в своем составе такие модули как «Модуль формирования признаков модели», «Модуль оценки человеческих ресурсов», «Модуль оценки логистики», «Модуль оценки технических ресурсов», «Модуль расчета комплексного показателя».

Основные компоненты (модули) ИСППР, представленные на рисунке 21, предназначены для решения задач информационно-аналитической поддержки диспетчера, связанных с оценкой оперативной готовности ОВБ и принятием решений по их назначению на ликвидацию аварий.

Корпоративное хранилище данных (далее – КИХ).

В связи с персонализированным характером данных необходимо создание аналитического хранилища данных с возможностью обработки большого объема данных, например на базе Apache Iceberg.

Специализированная база данных для хранения онтологий.

Модуль предназначен для хранения онтологий и может быть реализован на основе графовой базы данных Neo4j. Описанная архитектура носит универсальный характер и может быть применена в практических задачах по созданию ИСППР.

Модуль формирования признаков модели.

Данный модуль реализует процедуры формирования признакового пространства, используемого в дальнейшем для оценки оперативной готовности ОВБ и принятия решений. В его основе лежит разработанный в параграфе 3.1 метод формирования слоя признаков модели, обеспечивающий преобразование исходных разнородных данных в их структурированное представление.

Модуль выполняет задачи агрегации, нормализации и трансформации исходных данных, поступающих из КИХ, с учетом специфики предметной области. В результате формируется набор признаков, отражающих текущее состояние человеческих, технических и логистических ресурсов, а также внешних условий функционирования ОВБ. Реализация модуля должна обеспечивать масштабируемость, возможность адаптации к изменению структуры входных данных и расширения набора признаков.

Модуль оценки человеческих ресурсов. Оригинальный модуль основан на предложенной в параграфе 2.2 методике формирования частного показателя «Человек» в рамках динамической модели управления ОВБ и должен быть выполнен в виде функции с возможностью передачи в модуль расчета комплексного показателя. Модуль должен поддерживать интеграцию с КИХ и иметь доступ к БД хранения онтологий.

Модуль оценки технических ресурсов. Оригинальный модуль основан на предложенной в параграфе 3.2.2 методике формирования частного показателя «Техника» в рамках динамической модели управления ОВБ и должен быть выполнен в виде функции с возможностью передачи в модуль расчета комплексного показателя. Модуль должен обеспечивать интеграцию с КИХ.

Модуль оценки логистики. Оригинальный модуль основан на предложенных в параграфе 3.2.3 методике формирования частного показателя «Логистика» в рамках динамической модели управления ОВБ и должен быть выполнен в виде функции с возможностью передачи в модуль расчета комплексного показателя. Модуль должен поддерживать интеграцию с КИХ.

Модуль оценки важности подсистем. Оригинальный модуль основан на предложенных в параграфе 3.3 численном методе. Необходимо предусмотреть специализированное пространство (Minio) для хранения лучшей по качеству модели и возможности инференса.

Модуль расчета комплексного показателя. Должен реализовывать расчет комплексного показателя оперативной готовности ОВБ согласно описанной во второй главе модели взаимодействия внутри ОВБ и внешних воздействий. Вызов функций расчета комплексного показателя осуществляется с использованием разработанного автором программного комплекса «Показатель готовности ОВБ» (свидетельство о регистрации Роспатента № 2026611854 от 11.01.2026)

Модуль контроля результатов. Реализует предложенные в параграфе 2.2 функции индивидуального уровня.

Выводы к главе 4

Проведенный вычислительный эксперимент по подтверждению эффективности метода управления оперативно-выездными бригадами при назначении на аварийно-восстановительные работы показал, что разработанный численный метод и реализующий его программный комплекс обеспечивают статистически значимое улучшение ключевых метрик качества оперативного управления по сравнению с традиционным нормативным подходом.

В ходе исследования установлено, что применение методов машинного обучения для определения весовых коэффициентов частных показателей «Человек», «Техника» и «Логистика» позволяет существенно повысить точность восстановления структуры значимости критериев. Доказано, что модель Ridge, обеспечившая минимальное значение ошибки (MSE), а также устойчивое воспроизведение ранговой структуры критериев.

Результаты второго этапа вычислительного эксперимента показали, что использование разработанного численного метода управления ОВБ приводит к снижению среднего времени устранения аварий на 9,03%, увеличению доли выполнения нормативов SLA по прибытии бригады на место аварии и ее устранению на 15,38% и 14,56% соответственно, а также к снижению значения показателя SAIDI на 5,25%. Указанные изменения свидетельствуют о повышении оперативности управления аварийно-восстановительными работами.

Дополнительно установлено, что применение разработанного численного метода снижает время ликвидации аварий повышенной сложности, что подтверждает его способность более эффективно учитывать совокупность факторов, влияющих на оперативную готовность бригад, по сравнению с ручным диспетчерским назначением.

Разработанная архитектура программного комплекса обеспечивает реализацию предложенного метода в условиях, близких к реальному времени, и отвечает требованиям масштабируемости, отказоустойчивости и высокой доступности.

Таким образом, полученные результаты подтверждают выдвинутые гипотезы исследования, а разработанный численный метод управления оперативно-выездными бригадами, основанный на использовании комплексного показателя оперативной готовности, обеспечивает повышение обоснованности и оперативности принимаемых решений. А также способствует снижению времени ликвидации аварий и повышению надежности электроснабжения потребителей.

Заключение

Итогом диссертационной работы является разработка и апробация динамической модели и метода управления ОВБ электросетевой компании, обеспечивающих достижение нормативного времени восстановления электроснабжения в условиях неоднородности, асинхронности и неполноты исходных 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.

Предложен численный метод оперативного управления параметрами оперативно-выездных бригад (состав, оснащение, маршрут следования), отличающийся от известных подходов тем, что выбор бригады осуществляется на основе максимизации агрегированного показателя готовности при выполнении нормативных и ресурсных ограничений. Метод предусматривает семантическое и временное выравнивание разнородных данных, обеспечивающей формирование согласованного пространства признаков для принятия управленческого решения, адаптивную корректировку весовых коэффициентов частных показателей на основе экспертных оценок и анализа исторических данных с применением методов машинного обучения, что позволяет учитывать изменяющиеся условия функционирования распределительной сети.

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., достигнутое среднее время расчёта – $11,15 \pm 1,68$ мс., что существенно меньше стандартного времени назначения диспетчером. Совокупность результатов

подтверждает поддержание заданной оперативности принятия решения в условиях стохастического поступления данных и аварийных событий; цель диссертационного исследования достигнута.

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

Модель и численный метод могут служить базой для постановки и решения более сложных задач в области интеллектуального управления распределительными электрическими сетями, включая многоагентную координацию АВР, совместную оптимизацию ресурсов и маршрутов, а также разработку цифровых двойников процессов восстановления электроснабжения.

Практическая значимость работы состоит в готовности, разработанном численном методе оперативного управления к внедрению в системах поддержки принятия решений электросетевых компаний. Реализация предложенного подхода позволяет повысить обоснованность назначения бригад, сократить время ликвидации аварийных ситуаций, снизить влияние субъективных факторов и повысить надёжность электроснабжения потребителей. Результаты вычислительных экспериментов подтверждают возможность сокращения времени восстановления за счёт более рационального распределения ресурсов и учёта реальной готовности оперативно-выездных бригад.

Предложенный в диссертации научно-методический аппарат применим к широкому классу задач управления эргатическими системами в условиях разнородных данных благодаря универсальности подхода к интеграции человеческих, технических и логистических факторов.

Список сокращений и условных обозначений

В настоящей диссертации применяют следующие сокращения и обозначения:

АВР – Аварийно-восстановительные работы;

АСДУ – Автоматизированная система диспетчерского управления;

диспетчер ОДУ (ЦДУ) – Диспетчер оперативно-диспетчерского управления (уровень центрального диспетчерского управления);

ЕЭС – Единая энергетическая система;

ИСППР – Интеллектуальная система поддержки принятия решений;

КИХ – Корпоративное хранилище данных;

ЛПР – Лицо принимающее решение;

ОВБ – Оперативно-выездная бригада;

ОДУ – Оперативно-диспетчерское управление;

ОТУ – Оперативно-технологическое управление;

РДУ – Региональное диспетчерское управление;

ТОиР – Техническое обслуживание и ремонт;

MCDM – Многокритериальное принятие решений;

MODM – Многоцелевая модель принятия решений;

RL – Reinforcement learning;

SLA – Service Level Agreement (соглашение об уровне обслуживания)

VRP – Vehicle Routing Problem.

Список литературы

Нормативные правовые акты

1. Об утверждении правил оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике [Постановление Правительства Российской Федерации от 27.12.2004 № 854] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2004. – № 52 (часть II). – Ст. 5518.
2. Об утверждении правил переключений в электроустановках : приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 13.09.2018 № 757 : [зарегистрировано в Минюсте России 22 ноября 2018 г. № 52754] // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2018. – № 49.
3. Об электроэнергетике : Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2003. – № 13. – Ст. 1177.
4. Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года [Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р] // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2009. – № 48. – Ст. 5836.
5. Типовая инструкция по организации эксплуатации систем телемеханики в энергосистемах. – Москва : Союзтехэнерго, 1979. – 120 с.

Стандарты

6. APCO American National Standard 1.113.2-2024 : Public Safety Communications Incident Handling Process. – Daytona Beach, FL : APCO International, 2024. – 41 p. – ISBN 978-1-943877-52-2. – Текст : электронный. – URL : <https://www.apcointl.org/~documents/standard/11132-2024-psc-incident-handling-process> (дата обращения: 19.04.2026).

Электронные ресурсы

7. Автоматизация подстанций для построения интеллектуальных электросетей / Cisco Systems. – 2010. – 5 с. – Текст : электронный. – URL : http://www.akvalis.ru/files/project_193/product_catalogue/resheniya_po_avtomatizacii_podstancij.pdf (дата обращения: 19.01.2026).

8. Годовой отчет о выполнении Государственной программы города Москвы «Развитие транспортной системы» за 2022 год / Департамент транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры города Москвы. – Москва, 2022. – 227 с. – Текст : электронный. – URL : <https://www.mos.ru/dt/documents/dokumenti/view/287857220/> (дата обращения: 15.02.2026).

9. Двойники в сетях : как цифровизация меняет энергетику России / СберПро : сайт. – 2023. – Текст : электронный. – URL : <https://sber.pro/publication/dvojniki-v-setyah-kak-cifrovizaciya-menyaet-energetiku-rossii/> (дата обращения: 15.01.2026).

10. Искусственный интеллект предсказывает аварии в сетях / Электроэнергия. Передача и распределение : сайт. – 2025. – Текст : электронный. – URL : <https://eepir.ru/new/iskusstvennyj-intellekt-predskazyvaet-avarii-v-nbsp-setyah> (дата обращения: 15.01.2026).

11. Карта ДТП : некоммерческий проект со статистическими данными дорожно-транспортных происшествий в России : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://dtp-stat.ru> (дата обращения: 12.03.2024).

12. Картографический онлайн-сервис VK Карты : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://maps.vk.com> (дата обращения: 13.03.2024).

13. Малафеев, А.В. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике : курс лекций / А.В. Малафеев, А.С. Пуряев ; Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова. – Магнитогорск, 2015. – 52 с. – Текст : электронный. – URL : https://aidarp.ru/документы/УМК/ODU_OPP_v_jelektroenergetike-2.pdf (дата обращения: 19.01.2026).

14. Расчет экономического эффекта от внедрения автоматической системы коммерческого учета электрической энергии (АСКУЭ) / Европейские системные технологии : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://est.by/расчет-экономического-эффекта-аскуэ/> (дата обращения: 15.01.2026).

15. Цифровые двойники меняют процессы управления в энергосистеме / Руководящие материалы по проектированию и эксплуатации электрических сетей

: сайт. – 2023. – Текст : электронный. – URL : <https://rum.cis-ees.ru/news/czifrovye-dvojniki-menyayut-proczechy-upravleniya-v-energosisysteme-tema-stati-v-zhurnale-rum/> (дата обращения: 15.01.2026).

16. Яндекс Карты, 2GIS, Google Maps – что эффективнее привлекает клиентов / Ревви : сайт. – Обновляется в течение суток. – Текст : электронный. – URL : <https://revvy.ai/blog/tpost/vu752d4ez1-yandeks-karti-2gis-google-maps-chto-effe> (дата обращения: 10.02.2024).

17. Яндекс.Погода : данные о текущих и прогнозируемых погодных условиях. Исторические погодные данные : сайт. – Обновляется в течение суток. – Текст : электронный. – URL : <https://yandex.ru/dev/weather/> (дата обращения: 10.02.2024).

18. Chen, Y. Sub-second Parallel State Estimation / Y. Chen, S. Wang, M. Rice [et al.]. – Richland, Washington : Pacific Northwest National Laboratory, 2014. – 34 p. – Текст : электронный. – DOI 10.2172/1169002. – URL : https://pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-23830.pdf (дата обращения: 19.01.2026).

19. Docker Documentation : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://docs.docker.com> (дата обращения: 20.03.2026).

20. Electricity 2024 : Analysis and forecast to 2026 / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2024. – 168 p. – Текст : электронный. – URL : <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6b2fd954-2017-408e-bf08-952fdd62118a/Electricity2024-Analysisandforecastto2026.pdf> (дата обращения: 12.01.2026).

21. Network Code on Emergency and Restoration : Implementation Guide for the Critical Tools and Facilities / ENTSO-E. – Brussels : ENTSO-E. – 2019. – 10 p. – Текст : электронный. – URL : <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/ncer-al/EU/implementation-guide-for-the-critical-tools-and-facilities-final.pdf> (дата обращения: 19.01.2026).

22. NetworkX Documentation : сайт. – Текст : электронный. – URL : <https://networkx.org/documentation/stable/> (дата обращения: 22.05.2026).

23. OpenStreetMap : открытый некоммерческий проект геоданных : сайт.
– Обновляется в течение суток. – Текст : электронный.
– URL : <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 20.03.2026).

24. PostgreSQL Documentation : сайт. – Текст : электронный. – URL :
<https://www.postgresql.org/docs> (дата обращения: 23.03.2026).

Диссертации

25. Гвоздев, Д.Б. Разработка эргатических моделей и методов обеспечения информационно-технологической готовности систем управления электроэнергетическими сетями : специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Дмитрий Борисович Гвоздев ; Публичное акционерное общество «Россети Московский регион». – Москва, 2024. – 426 с.
– Библиогр. 282-304.

26. Полюхович, М.А. Модели и методика геоинформационной поддержки управления территориальной системой обеспечения безопасности электроснабжения региона : специальность 1.6.20. Геоинформатика, картография : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Максим Алексеевич Полюхович ; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2023. – 198 с.
– Библиогр. 136-153.

Книги и монографии

27. Афанасьев, Н.А. Система технического обслуживания и ремонта оборудования энергохозяйств промышленных предприятий : (Система ТОРЭО) : монография / Н.А. Афанасьев, М.А. Юсипов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. – Тираж отсутствует. – ISBN 5-283-01001-5.

28. Баринов, В.А. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике : монография / Баринов В.А., Гамм А.З., Кучеров Ю.Н [и др.]. – Москва : Издательство МЭИ, 2000. – 646 с. – Тираж отсутствует. – ISBN 5-7046-0528-1.

29. Евдокименков, В.Н. Интеллектуальная поддержка экипажа на основе доверительной модели замкнутой эргатической системы «Самолёт-Лётчик» : монография / В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков, Р.В. Ким. – Москва : Физматлит, 2019. – 192 с. – Тираж отсутствует. – ISBN 978-5-9221-1844-6.

30. Кочкаров, Р.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений для аналитических и ситуационных центров : монография / Р.А. Кочкаров, А.В. Тимошенко, С.В. Мацеевич [и др.]. – Москва : ИНФРА-М, 2026. – 138 с. : цв. ил. – Тираж отсутствует. – ISBN 978-5-16-021518-1.

31. Поляк, Б.Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств : монография / Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков. – Москва : ЛЕНАНД, 2014. – 560 с. – Тираж отсутствует. – ISBN 978-5-9710-0793-7.

32. Проценко, П.П. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике : сборник учебно-методических материалов для направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» / П.П. Проценко. – Благовещенск : Амурский государственный университет, 2018. – 25 с. – ISBN 978-5-93493-325-9.

33. Шведин, Б.Я. Онтология предприятия : экспириентологический подход. Технология построения онтологической модели предприятия на основе анализа и структурирования живого опыта : монография / Б.Я. Шведин. – Москва : ЛЕНАНД, 2010. – 240 с. – Тираж отсутствует. – ISBN 978-5-9710-0308-3.

Статьи

34. Аристархов, В.А. Модель организации оперативной проверки пожарно-спасательных подразделений / В.А. Аристархов, Е.Ю. Спорягин, Н.Н. Левов // Управление в организационных системах. – 2024. – № 4. – С. 133-144. – ISSN 2071-9116.

35. Бакановский, А.М. Метод оптимизации режима электроэнергетической системы / А.М. Бакановский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2004. – № 2. – С. 28-36. – ISSN 1029-7448.

36. Бобырь, М.В. Анализ методов повышения надежности нечетких систем / М.В. Бобырь, Н.А. Милостная // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2017. – № 157. Том 7. – С. 22-30. – ISSN 1810-7206.

37. Бородин, В.А. Оптимизация ремонтных программ энергетического оборудования с использованием методов искусственного интеллекта / В.А. Бородин, А.В. Андриюшин, О.М. Проталинский [и др.] // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019 : материалы двенадцатой международной конференции. – Москва, 2019. – С. 576-579. – ISBN 978-5-91450-237-6.

38. Гвоздев, Д.Б. Повышение информационной безопасности автоматизированных систем диспетчерского управления в электроэнергетических системах / Д.Б. Гвоздев, О.Д. Архангельский // Вестник Московского энергетического института. – 2019. – № 3. – С. 27-36. – ISSN 1993-6982.

39. Гвоздев, Д.Б. Централизованная система управления уровнями напряжения в сетях 110–220 кВ Кубанской энергосистемы / Д.Б. Гвоздев // Электроэнергия. – 2015. – № 12. – С. 13-19. – ISSN 0013-5380.

40. Данилов, М.И. Алгоритм автоматизированного определения показателей надежности SAIDI и SAIFI по данным систем учета / М.И. Данилов, И.Г. Романенко, М.С. Демин [и др.] // Атомная энергия. – 2024. – № 3-4. Том 146. – С. 60-69. – ISSN 0004-7163.

41. Кабанов А.А., Дубовик С.А. Численные методы контроля редких событий в нелинейных стохастических системах / А.А. Кабанов, С.А. Дубовик // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – № 6. Том 22. – С. 291-297. – ISSN 1684-6427.

42. Кабанов, С.А. Оптимальное управление перемещением груза мостовым краном / С.А. Кабанов, Е.Н. Никулин, Б.Э. Якушев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2011. – № 5. Том 54. – С. 56-65. – ISSN 0021-3454.

43. Кабанов, С.А. Оптимальное управление разворотом самолета по различным критериям / С.А. Кабанов, Д.С. Кабанов. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 5. Том 158. – С. 48-53. – ISSN 1684-6427.

44. Калев, В.И. Решение задачи оптимального программного терминального управления расходом топлива ракеты-носителя / В.И. Калев, А.Ф. Шориков // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2019. – № 1. – С. 166-176. – ISSN 0002-3388.
45. Касаткин, Ф.Ю. Некомпенсаторная интегральная оценка качества работы центров обработки вызовов / Ф.Ю. Касаткин // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 4. – С. 200-243. – ISSN 2410-9916.
46. Кинжалиева, А.Р. Имитационная модель управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании / А.Р. Кинжалиева, А.А. Ханова // Системы анализа и обработки данных. – 2020. – № 2-3. Том 79. – С. 77-94. – ISSN 2782-2001.
47. Колесников, А.В. Интеллектуализация оперативно-технологического управления региональной электроэнергетикой методами когнитивных гибридных интеллектуальных систем. Часть 1 / А.В. Колесников, С.Б. Румовская, Э.В. Ясинский [и др.] // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия : Физико-математические и технические науки. – 2020. – № 4. – С. 57-87. – ISSN 2500-0403.
48. 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 2079-5920.
49. 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.
50. Комарова, Л.А. Градиентный метод количественной оценки стоимости профессиональных навыков / Л.А. Комарова // System Analysis & Mathematical Modeling. – 2026. – № 1. Том 8. – С. 21–33. – ISSN 2713-1734.
51. 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.

52. 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 2070-0970.

53. 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. – 2025. – № 2. Том 13. – С. 56-66. – ISSN 2307-8162.

54. 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 29. – С. 157-163. – ISSN 2411-1473.

55. Макаров, И.А. Композитные индексы для управления цифровизацией: методы формирования / И.А. Макаров // Вопросы государственного и муниципального управления. – 2024. – № 3. – С. 81-109. – ISSN 1999-5431.

56. Массель, Л.В. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике / Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова, Н.И. Пяткова // Онтология проектирования. – 2017. – № 1 (23). Том 7. – С. 66-76. – ISSN 2223-9537.

57. Мацеевич, С.В. Применение показателя когнитивной нагрузки графического элемента для обоснования требований к системе визуализации РЛС дальнего обнаружения / С.В. Мацеевич, У.А. Владко, А.Д. Зюзина [и др.] // Научная визуализация. – 2024. – № 3. Том 16. – С. 87-96. – ISSN 2017-3537.

58. Мельник, Е.Н. Онтологические модели для систем управления электроснабжением олимпийских объектов в Сочи / Е.Н. Мельник, А.Ю. Бадалов, Б.Я. Шведин [и др.] // Онтология проектирования. – 2014. – № 1 (11). Том 4. – С. 6-23. – ISSN 2223-9537.

59. Михайлова, С.С. Расчет показателей готовности выездных бригад на основе модели комплексных аварий на объектах критической инфраструктуры / С.С. Михайлова, С.В. Мацеевич, А.С. Захаров [и др.] // Нелинейный мир. – 2025. – № 3. Том 23. – С. 15-24. – ISSN 2070-0970.

60. Носов, М.А. Оптимизация количественного состава ремонтных бригад при управлении качеством технического обслуживания оборудования промышленных предприятий / М.А. Носов, А.Л. Сабина, Н.В. Анцева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. Том 11. – С. 202-210. – ISSN 2071-6168.
61. Пономарев, Н. Проблемы оценки надежности и эффективности оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике России / Н. Пономарев // Bulletin of the South Ural State University. Series «Power Engineering». – 2021. – № 2. – С. 33-40. – ISSN 1990-8512.
62. Проталинский, О.М. Адаптивная система прогнозирования надежности технологического оборудования объектов энергетики / О.М. Проталинский, И.А. Щербатов, А.А. Ханова [и др.] // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1. Том 59. – С. 93-105. – ISSN 1814-2400.
63. Прохоренко, В.В. Оперативно-технологическое управление и оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике: практические проблемы соотношения понятий / В.В. Прохоренко // Правовой энергетический форум. – 2022. – № 3. – С. 51-55. – ISSN 2312-4250.
64. Руденко, В.А. Оценка готовности вспомогательных горноспасательных команд / В.А. Руденко // Горные науки и технологии. – 2024. – № 3. Том 9. – С. 243-249. – ISSN 2500-0632.
65. Соловьев, Д.С. Метод объективизации значений весовых коэффициентов для принятия решений в многокритериальных задачах / Д.С. Соловьев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – № 1. Том 23. – С. 161–168. – ISSN 2226-1494.
66. Ставицкий, А.В. Внедрение современных технологий в работу оперативно-выездных бригад АО «СУЭНКО» по Тюменской области (обзор) / А.В. Ставицкий, Н.В. Сашина // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 6 (98). – С. 157-162. – ISSN 2073-0853.
67. Староверов, Б.А. Структура и этапы построения автоматизированной системы управления электросетями в масштабах региональной сетевой компании /

Б.А. Староверов, А.Е. Мозохин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2018. – № 3. Том 84. – С. 55-62. – ISSN 1994-0637.

68. Степанов, В.М. Имитационное и физическое моделирование систем электроснабжения для повышения надежности их работы / В.М. Степанов, И.М. Базыль // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 12-2. – С. 139-142. – ISSN 2017-0853.

69. Уразалиев, Н.С. Концептуальная структура имитационной модели логистических процессов управления ремонтами предприятия электрических сетей / Н.С. Уразалиев, А.А. Ханова, В.С. Тумпуров // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия : Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 2. – С. 91-100. – ISSN 2072-9502.

70. Усачев, А.Е. Перспективы развития АСКУЭ БП / А.Е. Усачев, М.М. Камалов, Ф.Ф. Муллин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2004. – № 3/4. – С. 146-150. – ISSN 1998-9903.

71. Шокин, Ю.И. Концепция риск-анализа технических систем с использованием цифровых двойников / Ю.И. Шокин, А.М. Лепихин, Н.А. Махутов [и др.] // Вычислительные технологии. – 2020. – № 4. Том 25. – С. 99–113. – ISSN 1560-7534.

Источники на иностранном языке

72. Afzal, U. Investigating Cognitive Load in Energy Network Control Rooms: Recommendations for Future Designs / U. Afzal, A. Prouzeau, L. Lawrence [et al.] // Frontiers in Psychology. – 2022. – Volume 13. – eISSN 1664-1078. – DOI 10.3389/fpsyg.2022.812677. – Текст : электронный. – URL : <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2022.812677/full> (дата обращения: 17.07.2026).

73. Alsenani, T. Power System Repair and Restoration: A Literature Review / T. Alsenani, A. Chapman, Z.Y. Dong // Submission Template for IET Research Journal Papers. – 2015. – P. 1-11. – ISSN 2051-3305.

74. Amani, F. Learning Optimal Crew Dispatch for Grid Restoration Following an Earthquake / F. Amani, F. Ardali, A. Kargarian // IEEE Transactions on Smart Grid. – eISSN 1949-3061. – Текст : электронный. – DOI 10.1109/TSG.2026.3700512. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/11552818> (дата обращения: 17.07.2026).
75. Andersen, M.S. Implementing a nationwide criteria-based emergency medical dispatch system: A register-based follow-up study / M.S. Andersen, S.P. Johnsen, J.N. Sørensen [et al.] // Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine. – 2013. – № 1. Volume 21. – Article 53. – ISSN 1757-7241. – Текст : электронный. – DOI 10.1186/1757-7241-21-53. – URL : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23835246/> (дата обращения: 17.07.2026).
76. Anderson, A.A. Distributed Rules-Based Deconfliction of ADMS Applications: Part 1: Requirements & Decomposition / A.A. Anderson, T. Wall, S. Vadari [et al.]. – Washington : U.S. Department of Energy, 2023. – 33 p. – Текст : электронный. – URL : https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-34604-1.pdf (дата обращения: 17.07.2026).
77. Anderson, N.R. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada : Causes and Recommendations / N.R. Anderson. U.S.-Canada Power System Outage Task Force, 2004. – 238 p. – Текст : электронный. – URL : <https://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/BlackoutFinal-Web.pdf> (дата обращения: 17.07.2026).
78. Asghari Gharakheili, M. New Multiattribute Decision Making Support Tool for Identifying Critical Components in Power Transmission Systems / M. Asghari Gharakheili, M. Fotuhi Firuzabad, P. Dehghanian // IEEE Systems Journal. – 2018. – № 1. Volume 12. – P. 316-327. – eISSN 1937-9234. – Текст : электронный. – DOI 10.1109/JSYST.2015.2500262. – URL : <https://www.semanticscholar.org/paper/A-New-Multiattribute-Decision-Making-Support-Tool-Gharakheili-Fotuhi%E2%80%90Firuzabad/c6f33b5fecdf64dd5b130b875730f34311e58daf> (дата обращения: 17.07.2026).

79. Aziz, T. A self-healing restoration of power grid based on two-stage adaptive decision-making strategy to enhance grid resilience / T. Aziz, M. Waseem, S. Liu [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2023. – Volume 154. – Article 109435. – eISSN 1879-3517. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.ijepes.2023.109435. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061523004921> (дата обращения: 17.07.2026).

80. Bahrami, S. Security-based critical power distribution feeder identification: Application of fuzzy BWM-VIKOR and SECA / S. Bahrami, M. Rastegar // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2022. – Volume 134. – Article 107395. – eISSN 1879-3517. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.ijepes.2021.107395. – URL : https://www.researchgate.net/publication/353412704_Security-based_critical_power_distribution_feeder_identification_Application_of_fuzzy_BWM-VIKOR_and_SECA (дата обращения: 17.07.2026).

81. Baltensperger, D. An optimal reactive power pre-dispatch approach for minimizing active power losses / D. Baltensperger, H. Rodrigues de Brito, S. Mishra [et al.] // Frontiers in Energy Research. – 2025. – Volume 13. Article 1632604. – eISSN 2296-598X. – Текст : электронный. – DOI 10.3389/fenrg.2025.1632604. – URL : <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2025.1632604/full> (дата обращения: 17.07.2026)

82. Başar, T. Control System Theory and Design / T. Başar, S. Meyn, W.R. Perkins // arXiv.org : официальный сайт. – 2020. – Текст : электронный. – DOI 10.48550/arXiv.2007.01367. – URL : <https://arxiv.org/abs/2007.01367> (дата обращения: 14.07.2024).

83. Batini, C. Methodologies for data quality assessment and improvement / C. Batini, C. Cappiello, Ch. Francalanci [et al.] // ACM Computing Surveys. – 2009. – № 3. Volume 41. – Article 16. – eISSN 1557-7341. – Текст : электронный. – DOI 10.1145/1541880.1541883. – URL : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1541880.1541883> (дата обращения: 14.07.2024).

84. Batista Silva, G.A. Dynamic Multi-Criteria Framework for Consumer Prioritization in Adaptive Network Restoration / G.A. Batista Silva, J.C. Cebrian,

H.K. Morales Paredes [et al.] // TechRxiv : официальный сайт.
 – Текст : электронный. – DOI 10.36227/techrxiv.176304993.32470095/v1.
 – URL : <https://www.techrxiv.org/doi/full/10.36227/techrxiv.176304993.32470095/v1>
 (дата обращения: 14.07.2024).

85. Berdahl, S. Insights into Advanced Distribution Management Systems / S. Berdahl. – National Laboratory of the Rockies (NLR), 2015. – 33 p.
 – Текст : электронный. – URL : https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-02/11-02-2015_doe-voe-insights-into-advanced-distribution-management-systems-report_508.pdf (дата обращения: 22.05.2026).

86. Blyskun, O. Algorithm of determining the readiness level of the flight crew based on fuzzy logic approaches / O. Blyskun, Y. Herasymenko, Y. Kolomiiets [et al.] // Sciences of Europe. – 2021. – № 80. Volume 2. – P. 46-49. – ISSN 3162-2364.

87. Brown, R. Electric Power Distribution Reliability : Second Edition / R. Brown. – London, New York, Boca Raton : CRC Press, 2009. – 520 p. – ISBN 978-1315222332.

88. Bukowski, L. Using fuzzy logic to support maintenance decisions according to Resilience-Based Maintenance concept / L. Bukowski, S. Werbińska-Wojciechowska // Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. – 2021. – № 2. Volume 23. – P. 294-307. – eISSN 2956-3860.
 – Текст : электронный. – DOI 10.17531/ein.2021.2.9. – URL : https://www.researchgate.net/publication/349863743_Using_fuzzy_logic_to_support_maintenance_decisions_according_to_Resilience-Based_Maintenance_concept
 (дата обращения: 22.05.2026).

89. Cormen, T.H. Introduction to Algorithms : Third Edition / T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest [et al.]. – Cambridge, MA : MIT Press, 2022. – 1312 p. – ISBN 978-0-262-03384-8.

90. Daraio, C. Accounting for Quality in Data Integration Systems: A Completeness-Aware Integration Approach / C. Daraio, S. Di Leo, M. Scannapieco // Scientometrics. – 2022. – № 3. Volume 127. – P. 1465-1490. – eISSN 1588-2861. – Текст : электронный.

– DOI 10.1007/s11192-022-04266-0. – URL :
https://www.researchgate.net/publication/358182960_Accounting_for_quality_in_data_integration_systems_a_completeness-aware_integration_approach (дата обращения: 17.07.2026).

91. Ding, T. Multiperiod Distribution System Restoration With Routing Repair Crews, Mobile Electric Vehicles, and Soft-Open-Point Networked Microgrids / T. Ding, Z. Wang, W. Jia [et al.] // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2020. – № 6. Volume 11. – P. 1-11. – eISSN 1949-3061. – Текст : электронный. – DOI 10.1109/TSG.2020.3001952. – URL :
https://www.researchgate.net/publication/342137055_Multiperiod_Distribution_System_Restoration_With_Routing_Repair_Crews_Mobile_Electric_Vehicles_and_Soft-Open-Point_Networked_Microgrids (дата обращения: 17.07.2026).

92. Dong, H. Evaluation of TPGU using entropy – improved TOPSIS – GRA method in China / H. Dong, K. Yang, G. Bai // PLOS ONE : официальный сайт. – 2022. – № 1. Volume 17. – eISSN 1932-6203. – Текст : электронный. – DOI 10.1371/journal.pone.0260974. – URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0260974> (дата обращения: 17.07.2026).

93. Enjavimadar, M. Optimal reliability-centered maintenance strategy based on the failure modes and effect analysis in power distribution systems / M. Enjavimadar, M. Rastegar // Electric Power Systems Research. – 2022. – Volume 203. – Article 107647. – eISSN 1873-2046. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.epsr.2021.107647. – URL : https://www.researchgate.net/publication/355786271_Optimal_reliability-centered_maintenance_strategy_based_on_the_failure_modes_and_effect_analysis_in_power_distribution_systems (дата обращения: 17.07.2026).

94. Euzenat, J. Ontology Matching : Second Edition / J. Euzenat, P. Shvaiko. – New York : Springer Heidelberg, 2007. – 497 p. – ISBN 978-3-642-38721-0.

95. Fanucchi, R. A multi-objective algorithm to determine patrol sequences for out-of-service nodes in power distribution feeders / R. Fanucchi, M. Bessani, M. Camillo [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2021. – Volume 196.

– Article 107198. – eISSN 1873-2046. – Текст : электронный. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779621001796?via%3Dihub> (дата обращения: 17.07.2026).

96. Fonseca, T. Drowsiness Detection in Drivers: A Systematic Review of Deep Learning-Based Models / T. Fonseca, S. Ferreira // *Applied Sciences*. – 2025. – № 16. Volume 15. – Article 9018. – eISSN 2076-3417. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/app15169018. – URL : <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/16/9018> (дата обращения: 17.07.2026).

97. Gazal Ayal, O., Elyoseph, Z., Solomon, A. Evaluating Large Language Models as Judicial Decision-Makers / O. Gazal Ayal, Z. Elyoseph, A. Solomon // *Justice Quarterly*. – 2026. – P. 1-36. – eISSN 1745-9109. – Текст : электронный. – DOI 10.1080/07418825.2026.2618254. – URL : https://www.researchgate.net/publication/400051111_Evaluating_Large_Language_Models_as_Judicial_Decision-Makers_Evaluating_Large_Language_Models_as_Judicial_Decisions (дата обращения: 17.07.2026).

98. Ghasemi, S. A new Look-ahead Restoration of Critical Loads in the Distribution Networks during Blackout with considering Load curve of Critical Loads / S. Ghasemi, M. Mohammadi, J. Moshtagh // *Electric Power Systems Research*. – 2021. – № 2. Volume 191. – Article 106873. – eISSN 1873-2046. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.epsr.2020.106873. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779620306714?via%3Dihub> (дата обращения: 17.07.2026).

99. Ghasemi, S. Critical loads restoration of distribution networks after blackout by microgrids to improve network resiliency / S. Ghasemi, A. Darwesh, J. Moshtagh // *Electrical Engineering*. – 2023. – № 3. Volume 105. – P. 2909-2922. – eISSN 1432-0487. – Текст : электронный. – DOI 10.1007/s00202-023-01832-4. – URL : https://www.researchgate.net/publication/371005284_Critical_loads_restoration_of_distribution_networks_after_blackout_by_microgrids_to_improve_network_resiliency (дата обращения: 17.07.2026).

100. Gray, G. Advanced Metering Infrastructure to Outage Management System Integration / G. Gray // Electric Power Research Institute (EPRI) Technical Report. – 2015. – 60 p. – EPRI Product ID 3002002858. – Текст : электронный. – URL : <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002002858/0/Product> (дата обращения: 17.07.2026).

101. Grabisch, M. Monograph: Aggregation Functions / M. Grabisch, J.-L. Marichal, R. Mesiar [et al.] // Acta Polytechnica Hungarica. – 2009. – № 1. Volume 6. – P. 79-94. – ISSN 1785-8860. – Текст : электронный. – DOI 10.1109/SISY.2008.4664901. – URL : https://www.researchgate.net/publication/228684146_Monograph_Aggregation_Functions (дата обращения: 17.07.2026).

102. Greco, S. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys / S. Greco, M. Ehrgott, J.R. Figueira [et al.]. – Berlin : Springer, 2021. – 1347 p. – ISBN 978-1-4939-3093-7.

103. Guarino, S. A Spatial Decision Support System for Prioritizing Repair Interventions on Power Networks / S. Guarino, G. Oliva, A.D. Pietro [et al.] // IEEE Access. – 2023. – Volume 11. – P. 34616-34629. – eISSN 2169-3536. – Текст : электронный. – DOI 10.1109/ACCESS.2023.3264686. – URL : https://www.researchgate.net/publication/369840814_A_Spatial_Decision_Support_System_for_Prioritizing_Repair_Interventions_on_Power_Networks (дата обращения: 17.07.2026).

104. Guo, H. Transformer maintenance strategy based on improved risk assessment method considering operation and maintenance costs / H. Guo, Y. Wang, H. Bo [et al.] // PLOS ONE : официальный сайт. – 2025. – № 12. Volume 20. – Article e0338610. – eISSN 1932-6203. – Текст : электронный. – DOI 10.1371/journal.pone.0338610. – URL : <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0338610> (дата обращения: 17.07.2026).

105. Hall, D. An introduction to multisensor data fusion / D. Hall, J. Llinas // Proceedings of the IEEE. – 1997. – № 1. Volume 85. – P. 6-23.

– eISSN 1558-2256. – Текст : электронный. – DOI 10.1109/5.554205. – URL : https://www.researchgate.net/publication/2985118_An_introduction_to_multisensor_data_fusion (дата обращения: 17.07.2026).

106. Hao, S. Language MPC: Large Language Models as Decision Makers for Autonomous Driving / S. Hao, Y. Mu, Y. Jiang [et al.] // arXiv.org : официальный сайт. – eISSN 2331-8422. – DOI 10.48550/arXiv.2310.03026. – Текст : электронный. – URL : <https://arxiv.org/abs/2310.03026> (дата обращения: 17.07.2026).

107. Jaskólski, M. The Evolution of Low- and Medium-Voltage Distribution System Development Planning Procedures and Methods : A Review / M. Jaskólski, P. Bućko, S. Czapp // Energies. – 2025. – Volume 18. – Article 3461. – eISSN 1996-1073. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/en18133461. – URL : <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/13/3461> (дата обращения: 17.07.2026).

108. Jensen, C.S. Temporal data management / C.S. Jensen, R. Snodgrass // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 1999. – № 1. Volume 11. – P. 36-44. – eISSN 1558-2191. – Текст : электронный. – DOI 10.1109/69.755610. – URL : https://www.researchgate.net/publication/2757556_Temporal_Data_Management (дата обращения: 17.07.2026).

109. Kalantayevskaya, N. Design of decision-making support system in power grid dispatch control based on the forecasting of energy consumption / N. Kalantayevskaya, K. Koshekov, S. Latypov [et al.] // Cogent Engineering. – 2022. – № 1. Volume 9. – eISSN 2331-1916. – Текст : электронный. – DOI 10.1080/23311916.2022.2026554. – URL : https://www.researchgate.net/publication/358419312_Design_of_decision-making_support_system_in_power_grid_dispatch_control_based_on_the_forecasting_of_energy_consumption (дата обращения: 17.07.2026).

110. Kaushik, H.D. Distribution Network Restoration: Resource Scheduling Considering Coupled Transportation-Power Networks / H.D. Kaushik, R.A. Jacob, S. Chowdhury [et al.] // arXiv.org : официальный сайт.

– eISSN 2331-8422. – Текст : электронный. – DOI 10.48550/arXiv.2404.13422.
– URL : <https://arxiv.org/abs/2404.13422> (дата обращения: 17.07.2026).

111. Kimball, R. The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling : Third Edition / R. Kimball, M. Ross. – Indianapolis : Wiley, 2013. – 600 p. – ISBN 978-1-118-53080-1.

112. Komarova, L. Composite Index for Managing Emergency Repair in Electrical Utilities under Heterogeneous Incident Data / L. Komarova, A. Timoshenko, A. Kochkarov // Energy Systems Research. – 2026. – № 1. Volume 9. – P. 28-37. – ISSN 2618-9992.

113. Korkina, E.S. Reliability Analysis of State Estimation Software Based on SCADA and WAMS / E.S. Korkina, I.N. Kolosok, A.A. Tikhonov // Energy Systems Research. – 2018. – № 1. Volume 1. – P. 100-107. – ISSN 2618-9992.

114. Lei, S. Resilient Disaster Recovery Logistics of Distribution Systems: Co-Optimize Service Restoration With Repair Crew and Mobile Power Source Dispatch / S. Lei, Ch. Chen, Y. Li [et al.] // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2019. – № 6. Volume 10. – P. 6187-6202. – eISSN 1949-3061. – Текст : электронный. – DOI 10.1109/TSG.2019.2899353. – URL : https://www.researchgate.net/publication/331106826_Resilient_Disaster_Recovery_Logistics_of_Distribution_Systems_Co-Optimize_Service_Restoration_With_Repair_Crew_and_Mobile_Power_Source_Dispatch (дата обращения: 17.07.2026).

115. Li, X. Quantifying the Social Costs of Power Outages and Restoration Disparities Across Four U.S. Hurricanes / X. Li, J. Ma, B. Li [et al.] // arXiv.org : официальный сайт. – eISSN 2331-8422. – Текст : электронный. – DOI 10.48550/arXiv.1806.00758. – URL : <https://arxiv.org/abs/1806.0758> (дата обращения: 17.07.2026).

116. Little, R. Statistical Analysis with Missing Data : Third Edition / R. Little, D. Rubin. – Wiley Series in Probability and Statistics, 2019. – 450 p. – ISBN 978-1-119-48226-0.

117. Meyer, S. Simulation modeling for energy systems analysis: a critical review / S. Meyer, H. Zhang, J. Doe // Energy Informatics. – 2024. – № 1. Volume 7.

– Article 75. – eISSN 2520-8942. – Текст : электронный.
 – DOI 10.1186/s42162-024-00374-8. – URL :
https://www.researchgate.net/publication/383459976_Simulation_modeling_for_energy_systems_analysis_a_critical_review (дата обращения: 17.07.2026).

118. Mirhosseini, M. Asset management and maintenance programming for power distribution systems: A review / M. Mirhosseini, F. Keynia // IET Generation, Transmission and Distribution. – 2021. – № 13. Volume 15. – P. 2287-2297. – eISSN 1751-8695. – Текст : электронный.
 – DOI 10.1049/gtd2.12177. – URL :
https://www.researchgate.net/publication/350634708_Asset_management_and_maintenance_programming_for_power_distribution_systems_A_review (дата обращения: 17.07.2026).

119. Miller, R. Framework for Current and New Data Quality Dimensions: An Overview / R. Miller, H. Whelan, M. Chrubasik [et al.] // Data. – 2024. – № 13. Volume 9. – Article 151. – eISSN 2306-5729. – Текст : электронный.
 – DOI 10.3390/data9120151. – URL : <https://www.mdpi.com/2306-5729/9/12/151> (дата обращения: 17.07.2026).

120. Moradi-Sarvestani, S. A three-stage reliability-centered framework for critical feeder identification, failure modes prioritization, and optimal maintenance strategy assignment in power distribution system / S. Moradi-Sarvestani, M.R. Dehbozorgi, M. Rastegar // Electric Power Systems Research. – 2024. – Volume 230. – Article 110215. – eISSN 1873-2046. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.epsr.2024.110292. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779624001032> (дата обращения: 17.07.2026).

121. Naranjo, J.E. Wearable Sensors in Industrial Ergonomics: Enhancing Safety and Productivity in Industry 4.0 / J.E. Naranjo, C.A. Mora, D.F. Bustamante Villagómez [et al.] // Sensors. – 2025. – № 5. Volume 25. – Article 1526. – eISSN 1876-1119. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/s25051526. – URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/5/1526> (дата обращения: 17.07.2026).

122. Nardo, M. Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide / M. Nardo, M. Saisana, A. Saltelli [et al.]. – Paris : OECD Publishing, 2008. – 158 p. – ISBN 978-92-64-04345-9. – Текст : электронный. – URL : https://www.oecd.org/en/publications/handbook-on-constructing-composite-indicators-methodology-and-user-guide_9789264043466-en.html (дата обращения: 17.07.2026).

123. Naval, N. Assessment of cross-border electricity interconnection projects using a MCDA method / N. Naval, J.M. Yusta // International Journal of Critical Infrastructure Protection. – 2024. – Volume 46. – Article 100703. – ISSN 2212-2087. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.ijcip.2024.100703. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874548224000441> (дата обращения: 17.07.2026).

124. Nurul, F.G. Power System State Estimation Bad Data Detection and Identification: A Review on Issues and Alternative Formulations / F.G. Nurul, N.N. Nursyarizal, I. Tazbir [et al.] // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2017. – № 1. Volume 8. – P. 122-128. – ISSN 2502-4752.

125. Paul, S. Resilience assessment and planning in power distribution systems: Past and future considerations / S. Paul, A. Poudyal, S. Poudel [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2024. – Volume 189, Part B. – Article 113991. – eISSN 1879-0690. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.rser.2023.113991. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123008493> (дата обращения: 17.07.2026).

126. Pokane, S.S. Optimum systems integration architecture for monitoring to manage an electricity utility / S.S. Pokane, M.C. Shilenge, A. Telukdarie // South African Journal of Information Management. – 2022. – № 1. Volume 24. – Article a1525. – eISSN 1560-683X. – Текст : электронный. – DOI 10.4102/sajim.v24i1.1525. – URL : https://www.researchgate.net/publication/365248668_Optimum_systems_integration_architecture_for_monitoring_to_manage_an_electricity_utility (дата обращения: 17.07.2026).

127. Rengaraj, M. Decision making on the state of transformers based on insulation condition using AHP and TOPSIS methods / M. Rengaraj, S. Subbaraj // IET Science, Measurement and Technology. – 2019. – № 2. Volume 14. – P. 137-145. – eISSN 1751-8830. – Текст : электронный. – DOI 10.1049/iet-smt.2018.5337. – URL : https://www.researchgate.net/publication/337250069_Decision_Making_on_State_of_Transformers_based_on_Insulation_Condition_using_AHP_and_TOPSIS_methods (дата обращения: 17.07.2026).

128. Rodkumnerd, P. Fuzzy Analytical Hierarchy Process-Based Multi-Criteria Decision Framework for Risk-Informed Maintenance Prioritization of Distribution Transformers / P. Rodkumnerd, T. Pothinun, S. Phumpho [et al.] // Energies. – 2026. – Volume 19. – Article 460. – eISSN 1996-1073. – Текст : электронный. – DOI 10.3390/en19020460. – URL : <https://www.mdpi.com/1996-1073/19/2/460> (дата обращения: 17.07.2026).

129. Rouholamini, M. Resiliency of electric power distribution networks: a review / M. Rouholamini, C. Wang, S. Magableh [et al.] // Journal of Infrastructure Preservation and Resilience. – 2025. – Volume 6. – Article 39. – eISSN 2662-2521. – Текст : электронный. – DOI 10.1186/s43065-025-00154-y. – URL : https://www.researchgate.net/publication/397798542_Resiliency_of_electric_power_distribution_networks_a_review (дата обращения: 17.07.2026).

130. Sadiq, M. Outage Management System for Power Distribution Network / M. Sadiq, S. Rahman // Engineering, Environmental Science : 2014 International Conference on Smart Electric Grid (ISEG). – Guntur, India, 2014. – P. 1-8. – ISBN 978-1-4799-4103-2.

131. Shuai, H. Post-storm repair crew dispatch for distribution grid restoration using stochastic Monte Carlo tree search and deep neural networks / H. Shuai, F. Li // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2023. – № 2. Volume 144. – Article 108477. – eISSN 1879-3517. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.ijepes.2022.108477. – URL : https://www.researchgate.net/publication/362590911_Post-storm_repair_crew_dispatch_for_distribution_grid_restoration_using_stochastic_Monte_Carlo_tree_search_and_deep_neural_networks

storm_repair_crew_dispatch_for_distribution_grid_restoration_using_stochastic_Monte_Carlo_tree_search_and_deep_neural_networks (дата обращения: 17.07.2026).

132. Si, R. A multi-agent reinforcement learning method for distribution system restoration considering dynamic network reconfiguration / R. Si, S. Chen, J. Zhang [et al.] // *Applied Energy*. – 2024. – № 7. Volume 372. – Article 123625. – eISSN 1872-9118. – Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.apenergy.2024.123625. – URL : <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v372y2024ics0306261924010080.html> (дата обращения: 17.07.2026).

133. Simon, H. *The New Science of Management Decision* / H. Simon. – New York : Harper & Row, 1977. – 64 p. – ISBN 978-0136161448.

134. Snodgrass, R. *Developing Time-Oriented Database Applications* / R. Snodgrass. – California : The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems, 2000. – 528 p. – ISBN 1-55860-436-7.

135. Steurer, M. Metrics for evaluating the performance of machine learning based automated valuation models / M. Steurer, R.J. Hill, N. Pfeifer // *Journal of Property Research*. – 2021. – № 2. Volume 38. – P. 99-129. – eISSN 1466-4453. – Текст : электронный. – DOI 10.1080/09599916.2020.1858937. – URL : https://www.researchgate.net/publication/350951640_Metrics_for_evaluating_the_performance_of_machine_learning_based_automated_valuation_models (дата обращения: 17.07.2026).

136. Taylor, J. Integrated SCADA/DMS/OMS: Increasing Distribution Operations Efficiency / J. Taylor, H. Kazemzadeh // *Electric Energy T&D*. – 2009. – № 1. – P. 31-34. – eISSN 1704-5363. – Текст : электронный. – URL : <https://electricenergyonline.com/energy/magazine/389/article/Integrated-SCADA-DMS-OMS-Increasing-Distribution-Operations-Efficiency.htm> (дата обращения: 17.07.2026).

137. Yang, Y. Co-optimized recovery framework for damaged coupled power-water systems with temporal-spatial coordination and MT-SOPs / Y. Yang, Z. Li, Y. Xu [et al.] // *Applied Energy*. – 2025. – Volume 401. – Article 126781. – eISSN 1872-9118.

– Текст : электронный. – DOI 10.1016/j.apenergy.2025.126781. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261925015119?via%3Dihub> (дата обращения: 17.07.2026).

138. Zhang, D. Transformer maintenance decision based on condition monitoring and fuzzy probability hybrid reliability assessment / D. Zhang, Zh. Chu, Q. Gui [et al.] // IET Generation, Transmission and Distribution. – 2022. – № 4. Volume 17. – P. 976-992. – eISSN 1751-8695. – Текст : электронный. – DOI 10.1049/gtd2.12718. – URL : <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/gtd2.12718> (дата обращения: 17.07.2026).

139. Zhu, H. Robust post-disaster repair crew dispatch for distribution systems considering the uncertainty of switches / H. Zhu, H. Xie, L. Tang [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2024. – Volume 155. – Article 109550. – eISSN 1879-3517. – Текст : электронный. – DOI 10.2139/ssrn.4376322. – URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061523006075> (дата обращения: 17.07.2026).

Приложение А

(информационное)

Пример расчета динамики системы на Python

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.ticker import MultipleLocator

# =====
# 1. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ
# =====
# Коэффициенты естественной деградации, 1/мин
lambda_H = 0.0040
lambda_E = 0.0025
lambda_L = 0.0032

# Весовые коэффициенты комплексного показателя
alpha_H = 0.45
alpha_E = 0.30
alpha_L = 0.25

# Начальные условия
H0 = 0.85
E0 = 0.85
L0 = 0.85

# Временной интервал, мин
t_start = 0.0
t_end = 100.0
dt = 0.05

# =====
# 2. ФУНКЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ
# =====

def calc_G(H, E, L, thresholds=None):
    H = np.clip(H, 0.0, 1.0)
    E = np.clip(E, 0.0, 1.0)
    L = np.clip(L, 0.0, 1.0)

    if thresholds is not None:
        H_min, E_min, L_min = thresholds
        if H < H_min or E < E_min or L < L_min:
            return 0.0

    return H**alpha_H * E**alpha_E * L**alpha_L

# =====
# 3. ПРАВАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ
# =====

```

```

def system(t, state, u_func, d_func):
    H, E, L = state
    u_H, u_E, u_L = u_func(t)
    d_H, d_E, d_L = d_func(t)

    dH_dt = -lambda_H * H + u_H - d_H
    dE_dt = -lambda_E * E + u_E - d_E
    dL_dt = -lambda_L * L + u_L - d_L

    return np.array([dH_dt, dE_dt, dL_dt], dtype=float)

# =====
# 4. ШАГ RK4
# =====

def rk4_step(t, state, dt, u_func, d_func):
    k1 = system(t, state, u_func, d_func)
    k2 = system(t + dt/2, state + dt*k1/2, u_func, d_func)
    k3 = system(t + dt/2, state + dt*k2/2, u_func, d_func)
    k4 = system(t + dt, state + dt*k3, u_func, d_func)

    next_state = state + dt * (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4) / 6
    return np.clip(next_state, 0.0, 1.0)

# =====
# 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ
# =====

def simulate(u_func, d_func):
    time = np.arange(t_start, t_end + dt, dt)
    state = np.array([H0, E0, L0], dtype=float)

    H_values = np.zeros(len(time))
    E_values = np.zeros(len(time))
    L_values = np.zeros(len(time))
    G_values = np.zeros(len(time))

    for i, t in enumerate(time):
        H_values[i], E_values[i], L_values[i] = state
        G_values[i] = calc_G(*state)

        if i < len(time) - 1:
            state = rk4_step(t, state, dt, u_func, d_func)

    return time, H_values, E_values, L_values, G_values

# =====
# 6. УЛУЧШЕННОЕ ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА
# =====

def plot_dynamics(time, H, E, L, G, title, filename, y_min=0.70,
y_max=0.88):

```

```

plt.figure(figsize=(10, 6))

plt.plot(time, H, label='«Человек» H(t)', linewidth=1.8)
plt.plot(time, E, '--', label='«Техника» E(t)', linewidth=1.8)
plt.plot(time, L, '-.', label='«Логистика» L(t)', linewidth=1.8)
plt.plot(time, G, label='Комплексный показатель G(t)', linewidth=2.8)

plt.xlabel('Время, минут')
plt.ylabel('Показатель готовности, отн. ед.')
# plt.title(title) # Removed this line to remove the title

plt.xlim(0, 100)
plt.ylim(y_min, y_max)

ax = plt.gca()
ax.xaxis.set_major_locator(MultipleLocator(10))
ax.xaxis.set_minor_locator(MultipleLocator(5))
ax.yaxis.set_major_locator(MultipleLocator(0.02))
ax.yaxis.set_minor_locator(MultipleLocator(0.01))

plt.grid(True, which='major', alpha=0.45, linestyle='-')
plt.grid(True, which='minor', alpha=0.20, linestyle=':')

plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.savefig(filename, dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.show()

# =====
# 7. РИСУНОК 4 – ПОСТОЯННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
# =====

# Воздействия в норм. ед./мин
u_H_const = 0.0028
u_E_const = 0.0021
u_L_const = 0.0023

d_H_const = 0.0035
d_E_const = 0.0020
d_L_const = 0.0029

def u_constant(t):
    return (u_H_const, u_E_const, u_L_const)

def d_constant(t):
    return (d_H_const, d_E_const, d_L_const)

time4, H4, E4, L4, G4 = simulate(u_constant, d_constant)

plot_dynamics(
    time4, H4, E4, L4, G4,
    'Рисунок 4. Динамика готовности при постоянных воздействиях',

```

```

        'figure4_minutes_var.png',
        y_min=0.62,
        y_max=0.86
    )

# =====
# 8. РИСУНОК 5 – ЛИНЕЙНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
# =====

# Коэффициенты в норм. ед./мин^2
# Сначала заметно снижение, затем более выраженное восстановление
k_u_H = 8.0e-5
k_u_E = 6.5e-5
k_u_L = 7.0e-5

k_d_H = 4.5e-5
k_d_E = 3.5e-5
k_d_L = 4.0e-5

def u_linear(t):
    return (k_u_H * t, k_u_E * t, k_u_L * t)

def d_linear(t):
    return (k_d_H * t, k_d_E * t, k_d_L * t)

time5, H5, E5, L5, G5 = simulate(u_linear, d_linear)

plot_dynamics(
    time5, H5, E5, L5, G5,
    'Рисунок 5. Динамика готовности при линейных воздействиях',
    'figure5_minutes_var.png',
    y_min=0.72,
    y_max=0.92
)

```

Приложение Б
(информационное)
Пример исходных данных

Таблица Б.1 – Пример исходных данных (таблица признаков) по подсистемам

Исходные данные для расчета – «Человек»									
Пара	$\widetilde{sm}_1$	$\widetilde{sm}_2$	n_{rel}	Δt_{train}	n_{joint}	p_{stab}	h	R_H	
b _{1-i₁}	0,920	0,860	14	3	18	0,950	4	1	
b _{1-i₂}	0,550	0,480	2	20	18	0,950	4	1	
b _{2-i₁}	0,600	0,580	3	14	12	0,900	4	1	
b _{2-i₂}	0,900	0,840	11	4	12	0,900	6	1	
Исходные данные для расчета – «Техника»									
Пара	s_v	p_v	a_v	$u_e p_e$	C_{aux}^E	n_r/n_r^{min}	c	c_{max}	R_E
b _{1-i₁}	0,950	0,900	1,000	0,855; 0,950; 0,810	0,880	1,200; 1,000; 1,100	42	50	1,000
b _{1-i₂}	0,950	0,550	1,000	0,550; 0,500; 0,600	0,600	0,600; 0,500; 0,700	55	45	0,700
b _{2-i₁}	0,900	0,600	0,950	0,650; 0,550; 0,600	0,620	0,800; 0,700; 0,900	52	50	0,700
b _{2-i₂}	0,930	0,950	1,000	0,900; 0,950; 0,900	0,850	1,000; 1,200; 1,000	38	45	1,000
Исходные данные для расчета – «Логистика»									
Пара	t_{ETA}	t_{max}	Δt_{delay}	w	C_{log}	C_{log}^{max}	R_L		
b _{1-i₁}	18	60	4	0,200	16	25	1		
b _{1-i₂}	36	90	8	0,100	28	25	1		
b _{2-i₁}	28	60	6	0,200	30	25	1		
b _{2-i₂}	20	90	3	0,100	18	25	1		

Источник: составлено автором.

Приложение В

(информационное)

Пример формирования экспертных матриц на Python

```

from __future__ import annotations

import argparse
import json
import os
from dataclasses import asdict, dataclass
from pathlib import Path
from typing import Any, Dict, List, Optional, Tuple

import pandas as pd
from dotenv import load_dotenv
from openai import OpenAI

from src.prompts import (
    PROMPT_SYSTEM_ALTS_INDS,
    PROMPT_SYSTEM_EXPERTS,
    PROMPT_SYSTEM_SCORES,
    PROMPT_USER_ALTS_INDS,
    PROMPT_USER_EXPERTS,
    PROMPT_USER_SCORES,
)

load_dotenv()

@dataclass
class ProblemSpec:
    domain: str
    objective: str
    n_alternatives: int
    n_indicators: int
    n_experts: int
    model: str
    temperature: float

@dataclass
class ExpertProfile:
    id: str
    name: str
    role: str
    years_exp: int
    competence: float
    style: str

def llm_json(

```

```

system: str,
user: str,
schema_name: str,
schema: Dict[str, Any],
model: str,
temperature: float,
client: OpenAI,
) -> Dict[str, Any]:
    system_message_content = (
        f"{system}\n\n"
        f"Ответ только в JSON и строго по схеме (имя схемы:
'{schema_name}'): \n"
        f"```json\n{json.dumps(schema, ensure_ascii=False,
indent=2)}\n```"
    )
    resp = client.chat.completions.create(
        model=model,
        temperature=temperature,
        response_format={"type": "json_object"},
        messages=[
            {"role": "system", "content": system_message_content},
            {"role": "user", "content": user},
        ],
    )
    text = resp.choices[0].message.content
    if not text:
        raise ValueError("LLM не вернул контент")

    try:
        data = json.loads(text)
    except json.JSONDecodeError as e:
        raise ValueError(f"Не удалось распарсить JSON. Ответ
модели: \n{text}") from e

    # Попытки развёртывания обёрток
    if isinstance(data, dict):
        if schema_name in data and isinstance(data[schema_name], dict):
            data = data[schema_name]
        elif len(data) == 1:
            only_key = next(iter(data))
            inner = data[only_key]
            if isinstance(inner, dict):
                data = inner

    if not isinstance(data, dict):
        raise ValueError(f"Ответ не является объектом JSON: {data}")

    return data

def generate_alternatives_and_indicators(
    spec: ProblemSpec, client: OpenAI

```

```

) -> Tuple[List[str], List[str]]:
    schema = {
        "type": "object",
        "properties": {
            "alternatives": {
                "type": "array",
                "items": {"type": "string"},
                "minItems": spec.n_alternatives,
                "maxItems": spec.n_alternatives,
            },
            "indicators": {
                "type": "array",
                "items": {"type": "string"},
                "minItems": spec.n_indicators,
                "maxItems": spec.n_indicators,
            },
        },
        "required": ["alternatives", "indicators"],
        "additionalProperties": False,
    }
    system = PROMPT_SYSTEM_ALTS_INDS
    user = PROMPT_USER_ALTS_INDS.format(
        domain=spec.domain,
        objective=spec.objective,
        n_alts=spec.n_alternatives,
        n_inds=spec.n_indicators,
    )
    out = llm_json(
        system, user, "alts_inds", schema, spec.model, spec.temperature,
client
    )
    if isinstance(out, dict) and "alternatives" in out and "indicators"
in out:
        return out["alternatives"], out["indicators"]

    # Попытка использовать examples, если модель вернула схему
    if (
        isinstance(out, dict)
        and "properties" in out
        and isinstance(out["properties"], dict)
    ):
        props = out["properties"]
        alts_ex = props.get("alternatives", {}).get("example")
        inds_ex = props.get("indicators", {}).get("example")
        if alts_ex and inds_ex:
            return alts_ex[: spec.n_alternatives], inds_ex[:
spec.n_indicators]

        raise ValueError(
            f"LLM не вернул поля alternatives/indicators. Ответ: {out}"
        )

```

```

def generate_experts(spec: ProblemSpec, client: OpenAI) ->
List[ExpertProfile]:
    schema = {
        "type": "object",
        "properties": {
            "experts": {
                "type": "array",
                "minItems": spec.n_experts,
                "maxItems": spec.n_experts,
                "items": {
                    "type": "object",
                    "properties": {
                        "id": {"type": "string"},
                        "name": {"type": "string"},
                        "role": {"type": "string"},
                        "years_exp": {"type": "integer", "minimum": 1,
"maximum": 45},
                        "competence": {"type": "number", "minimum": 0,
"maximum": 1},
                        "style": {"type": "string"},
                    },
                    "required": ["id", "name", "role", "years_exp",
"competence", "style"],
                    "additionalProperties": False,
                },
            },
        },
        "required": ["experts"],
        "additionalProperties": False,
    }
    system = PROMPT_SYSTEM_EXPERTS
    user = PROMPT_USER_EXPERTS.format(
        domain=spec.adomain,
        objective=spec.objective,
        n_experts=spec.n_experts,
    )
    out = llm_json(
        system, user, "experts", schema, spec.model, spec.temperature,
client
    )
    if not isinstance(out, dict) or "experts" not in out:
        raise ValueError(f"LLM не вернул поле experts. Ответ: {out}")
    experts: List[ExpertProfile] = []
    for e in out["experts"]:
        experts.append(
            ExpertProfile(
                id=e["id"],
                name=e["name"],
                role=e["role"],
                years_exp=int(e["years_exp"]),
                competence=float(e["competence"]),

```

```

        style=e["style"],
    )
)
return experts

def score_by_expert(
    expert: ExpertProfile,
    alternatives: List[str],
    indicators: List[str],
    spec: ProblemSpec,
    client: OpenAI,
) -> pd.DataFrame:
    schema = {
        "type": "object",
        "properties": {
            "scores": {
                "type": "array",
                "minItems": len(alternatives),
                "maxItems": len(alternatives),
                "items": {
                    "type": "object",
                    "properties": {
                        "alternative": {"type": "string"},
                        "values": {
                            "type": "array",
                            "minItems": len(indicators),
                            "maxItems": len(indicators),
                            "items": {"type": "number", "minimum": 0,
"maximum": 100},
                        },
                    },
                    "required": ["alternative", "values"],
                    "additionalProperties": False,
                },
            },
            "required": ["scores"],
            "additionalProperties": False,
        }
    }

    system = PROMPT_SYSTEM_SCORES
    user = PROMPT_USER_SCORES.format(
        id=expert.id,
        name=expert.name,
        role=expert.role,
        years=expert.years_exp,
        competence=expert.competence,
        style=expert.style,
        domain=spec.domain,
        objective=spec.objective,
        indicators="\n- ".join(indicators),
        alternatives="\n- ".join(alternatives),

```

```

    )
    out = llm_json(
        system, user, "scores", schema, spec.model, spec.temperature,
client
    )
    if not isinstance(out, dict) or "scores" not in out:
        raise ValueError(f"LLM не вернул поле scores. Ответ: {out}")
    df = pd.DataFrame(
        {
            "alternative": [row["alternative"] for row in out["scores"]],
            **{
                ind: [row["values"][i] for row in out["scores"]]
                for i, ind in enumerate(indicators)
            },
        }
    ).set_index("alternative")
    df = df.loc[alternatives, indicators]
    return df

def build_wide_table(
    alternatives: List[str],
    indicators: List[str],
    experts: List[ExpertProfile],
    matrices: Dict[str, pd.DataFrame],
) -> pd.DataFrame:
    rows = []
    for alt in alternatives:
        for ind in indicators:
            row = {"alternative": alt, "indicator": ind}
            for e in experts:
                row[e.id] = float(matrices[e.id].loc[alt, ind])
            rows.append(row)
    return pd.DataFrame(rows).set_index(["alternative", "indicator"])

def generate_dataset(spec: ProblemSpec, client: OpenAI) -> Dict[str,
Any]:
    alternatives, indicators = generate_alternatives_and_indicators(spec,
client)
    experts = generate_experts(spec, client)
    matrices: Dict[str, pd.DataFrame] = {}
    for expert in experts:
        matrices[expert.id] = score_by_expert(
            expert, alternatives, indicators, spec, client
        )

    table_wide = build_wide_table(alternatives, indicators, experts,
matrices)
    return {
        "spec": asdict(spec),
        "alternatives": alternatives,

```

```

        "indicators": indicators,
        "experts": [asdict(e) for e in experts],
        "scores": {
            e.id: matrices[e.id].reset_index().to_dict(orient="records")
for e in experts
        },
        "table_wide": table_wide.reset_index().to_dict(orient="records"),
    }

def main() -> None:
    parser = argparse.ArgumentParser(description="Генерация MAGDM-
датасета через LLM")
    parser.add_argument("--n-alternatives", type=int, default=5)
    parser.add_argument("--n-indicators", type=int, default=6)
    parser.add_argument("--n-experts", type=int, default=4)
    parser.add_argument("--domain", type=str, required=True)
    parser.add_argument("--objective", type=str, required=True)
    parser.add_argument("--model", type=str, default="gpt-3.5-turbo-
1106")
    parser.add_argument("--temperature", type=float, default=0.6)
    parser.add_argument(
        "--api-key",
        type=str,
        default=None,
        help="Опционально: ключ OpenAI. Если не задан, берётся из
переменной окружения OPENAI_API_KEY.",
    )
    args = parser.parse_args()

    spec = ProblemSpec(
        domain=args.domain,
        objective=args.objective,
        n_alternatives=args.n_alternatives,
        n_indicators=args.n_indicators,
        n_experts=args.n_experts,
        model=args.model,
        temperature=args.temperature,
    )
    api_key = args.api_key or os.getenv("OPENAI_API_KEY")
    if not api_key:
        raise RuntimeError(
            "Не найден OPENAI_API_KEY: задайте переменную окружения или
передайте --api-key."
        )
    client = OpenAI(api_key=api_key)

    data = generate_dataset(spec, client)

    out_dir = Path("out")
    out_dir.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
    dataset_path = out_dir / "dataset.json"

```

```

table_path = out_dir / "table_wide.csv"

with dataset_path.open("w", encoding="utf-8") as f:
    json.dump(data, f, ensure_ascii=False, indent=2)

df_table = pd.DataFrame(data["table_wide"]).set_index(["alternative",
"indicator"])
df_table.to_csv(table_path, encoding="utf-8")

print("=== Широкая таблица (head) ===")
print(df_table.head(12))
print(f"\nСохранено: {dataset_path}, {table_path}")

if __name__ == "__main__":
    main()

```