**ИНФОРМАТИКА**

УДК 004.9:519.174 DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_3_68_97
EDN: DKGWKM

# ВЕРОЯТНОСТНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

**Е. И. Сукач, В. А. Калиниченко**

*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины*

# PROBABILISTIC-ALGEBRAIC MODELING OF RELIABILITY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS USING SPATIAL AND TEMPORAL DATA ANALYSIS

**E. I. Sukach, V. A. Kalinichenko**

*Francisk Skorina Gomel State University*

**Аннотация.** Рассматривается способ получения вероятностной оценки надежности электроэнергетической системы по вероятностным характеристикам надежности её структурных элементов. Вероятностные характеристики надежности структурных элементов исследуемых объектов предлагается вычислять с использованием программного комплекса интеллектуального пространственно-временного анализа данных, позволяющего автоматически агрегировать заявки об авариях, поступающие от населения через мессенджер, и проводить ситуационный анализ поступающих данных в режиме реального времени. Рассматривается пример вероятностно-алгебраического моделирования фрагмента электроэнергетической системы, формализованной в виде системы-трехполюсника.

**Ключевые слова:** *электроэнергетические системы*, *сетевые структуры*, *вероятностно-алгебраическое моделирование*, *надежность*, *энергоснабжение*, *автоматизация*, *большие данные*, *ситуационный анализ*, *геоинформационные системы*, *телеграм-бот*, *кластеризация данных*, *контейнеризация*.

**Для цитирования:** *Сукач*, *Е. И.* Вероятностно-алгебраическое моделирование надежности электроэнергетических систем с использованием пространственно-временного анализа данных / Е. И. Сукач, В. А. Калиниченко // Проблемы физики, математики и техники. – 2026. – № 3 (68). – С. 97–105. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_3_68_97. – EDN: DKGWKM

**Abstract.** A method for obtaining a probabilistic assessment of the reliability of an electric power system based on the probabilistic characteristics of the reliability of its structural elements are considered. It is proposed to calculate the probabilistic reliability characteristics of the structural elements of the objects under study using a software package for intelligent spatial and temporal data analysis, which allows automatically aggregating requests for accidents from the public via messenger and conducting situational analysis of incoming data in real time. An example of probabilistic-algebraic modeling of a fragment of an electric power system formalized as a three-pole system is considered.

**Keywords:** *electric power systems*, *network structures*, *probabilistic-algebraic modeling*, *reliability*, *energy supply*, *automation*, *big data*, *situational analysis*, *geoinformation systems*, *telegram bot*, *data clusterization*, *containerization*.

**For citation:** *Sukach*, *E. I.* Probabilistic-algebraic modeling of reliability of electric power systems using spatial and temporal data analysis / E. I. Sukach, V. A. Kalinichenko // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2026. – № 3 (68). – P. 97–105. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2026_3_68_97 (in Russian). – EDN: DKGWKM

## Введение

Электроэнергетические системы, включающие в себя множество структурных элементов, подверженных как естественному износу, так и случайному воздействию факторов внешней среды, относятся к классу потенциально-опасных объектов городской инфраструктуры. Общие принципы и логика подготовки проектного решения при исследовании подобных объектов требуют проведения детального сравнительного анализа вариантов их организации.

В связи с этим возникает актуальная задача применения имеющих практическую ценность и обеспечивающих объективный подход математических моделей и методов анализа вероятностных характеристик надёжности электросетевых структур с последующей оценкой вероятности их отказа в перспективном периоде, исходя из динамики вероятностного изменения характеристик надёжности их структурных элементов.

Одним из подходов к решению поставленной задачи является применение вероятностно-алгебраического моделирования [1], описание методологии которого для решения типовых задач исследования надежности электроэнергетических систем приводится в [2].

Параметризованные вероятностно-алгебраические модели в составе инструментального средства «ControlSyst» [3] снимают ограничения известных методов на число структурных

© *Сукач Е. И.*, *Калиниченко В. А.*, 2026

составляющих и позволяют учесть эволюционную зависимость элементов при рассмотрении объектов в динамике. Их использование не требует большого объема ресурсов, универсально при исследованиях в различных предметных областях и реализуется с использованием прозрачных простых алгоритмов обработки информации о надёжности структурных элементов исследуемой системы.

Современный уровень цифровизации позволяет использовать краудсорсинговые данные (заявки граждан через мессенджеры и чат-боты, информацию о плановых отключениях электроэнергии) для получения вероятностной оценки надёжности элементов электросетевых структур. Мониторинг состояния сложных электросетевых структур в режиме реального времени требует автоматизации получения, интеллектуальной обработки, пространственной визуализации и кластеризации поступающих больших данных для выявления отказов узлов и линий связи электросети.

В статье приводится описание программного комплекса, обеспечивающего интеллектуальную обработку текстовых и пространственно-временных данных, возникающих в процессе взаимодействия между поставщиками и потребителями электроэнергии. Зафиксированная информация («сигналы» об отсутствии электроэнергии) используется как для оперативного восстановления работоспособности участков сети, так и для долгосрочного анализа и прогноза надежности всей сети.

Пример расчета надёжности фрагмента электроэнергетической системы по вероятностным оценкам надёжности участков исследуемого объекта, полученным в результате пространственно-временного анализа больших данных, демонстрирует пригодность передложенного подхода.

## 1 Архитектура программного комплекса пространственно-временного анализа данных

Программный комплекс спроектирован как распределенная информационная система, основанная на микросервисном подходе и строгом соблюдении принципа разделения ответственности. Выбранная архитектурная модель позволяет изолировать интерфейсную логику от сложных алгоритмов ситуационного анализа и механизмов хранения данных, что существенно повышает общую отказоустойчивость и упрощает процессы дальнейшей модификации системы. Структурно комплекс представляет собой совокупность взаимосвязанных функциональных узлов, каждый из которых инкапсулирует определенный слой бизнес-логики и взаимодействует с остальными компонентами через стандартизированные протоколы (рисунок 1.1).

Данная схема демонстрирует разделение комплекса на три ключевых логических уровня: слой пользовательского взаимодействия, уровень серверной обработки и прикладной аналитики, а также уровень персистентного хранения данных в реляционной системе управления базами данных (СУБД). Подобная декомпозиция архитектуры на независимые микросервисы, работающие внутри изолированных контейнеров, позволяет эффективно масштабировать каждый узел системы по мере роста количества абонентов и интенсивности потока поступающих аварийных заявок, обеспечивая при этом высокую доступность сервиса в условиях городской энергетической сети.

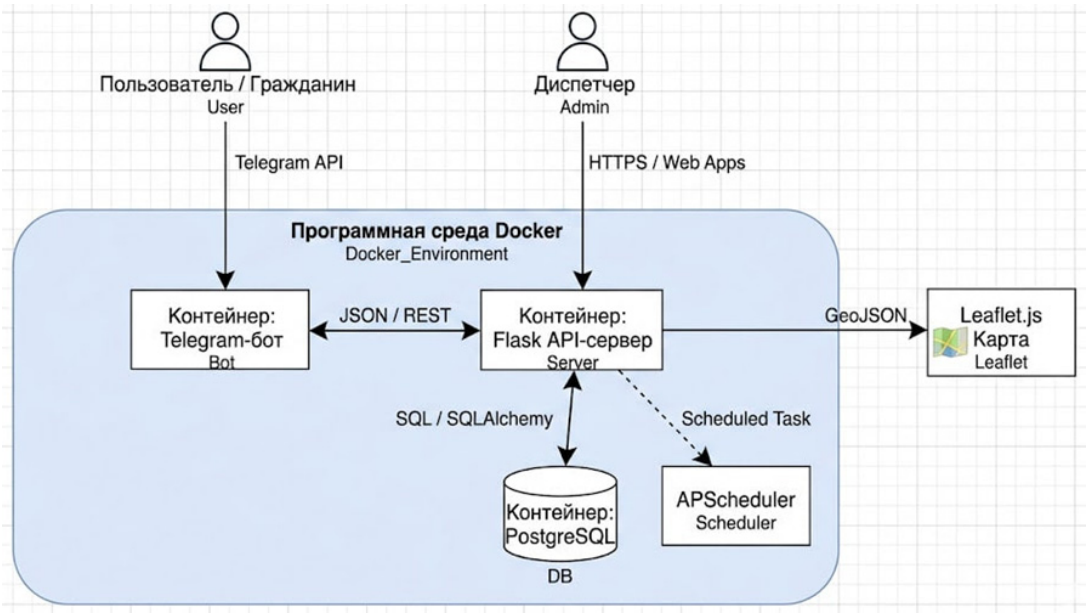



Рисунок 1.1 – Структурная схема программного комплекса пространственно-временного анализа данных

В качестве основного узла взаимодействия с конечными пользователями выступает модуль Telegram-бота, реализованный с применением библиотеки pyTelegramBotAPI [4]. Этот сервис функционирует в режиме непрерывного опроса серверов мессенджера и отвечает за управление состояниями диалогов, навигацию по многоуровневому меню и первичный прием текстовых данных от потребителей энергии. Архитектурно бот спроектирован таким образом, чтобы не выполнять ресурсозатратные вычисления внутри своего основного потока, делегируя задачи по обработке инцидентов и запросу статистики внешнему API-серверу, что позволяет сохранять высокую скорость отклика пользовательского интерфейса.

Роль центрального вычислительного ядра и API-шлюза выполняет Flask-сервер, который объединяет в себе функции информационного обмена и аналитического центра [5]. Через набор RESTful-эндпоинтов данный узел обеспечивает асинхронную передачу данных в формате JSON для работы web-панелей диспетчера и панели управления сотрудниками. Внутренняя логика сервера включает программную реализацию интеллектуальных алгоритмов автоматической приоритизации обращений и их пространственной кластеризации для дедупликации инцидентов. Кроме того, серверный модуль управляет изолированным процессом планировщика фоновых задач APScheduler, который в автономном режиме контролирует расписание плановых отключений и инициирует массовые рассылки через интеграцию с интерфейсом мессенджера.

Слой хранения и управления информацией представлен реляционной СУБД PostgreSQL, которая выступает в качестве единого централизованного хранилища для всех компонентов системы. Выбор данной СУБД продиктован её способностью эффективно обрабатывать параллельные транзакции и поддерживать высокую целостность данных в условиях многопользовательского доступа со стороны бота и web-сервера. Программное взаимодействие с таблицами базы данных абстрагировано через слой объектно-реляционного отображения SQLAlchemy, что позволяет описывать модель предметной области в виде классов Python и автоматически обеспечивать защиту от несанкционированных SQL-запросов.

Инфраструктурная целостность и портативность всего программного комплекса достигается путем применения технологий контейнеризации в среде Docker. Каждый функциональный узел системы развернут в собственном изолированном контейнере с индивидуально настроенным окружением и переменными конфигурации. Оркестратор Docker Compose объединяет данные контейнеры в закрытую виртуальную сеть, обеспечивая безопасную внутреннюю связность компонентов и гарантируя полную идентичность работы программного обеспечения на этапах разработки, тестирования и развертывания.

**2 Алгоритмическое обеспечение ситуационного анализа**

Ситуационный анализ является наиболее технологически сложной частью программного комплекса, преобразующей поток разрозненных текстовых сообщений от потребителей в структурированную аналитическую информацию. Ключевая задача данного модуля заключается в автоматизации рутинных процессов диспетчеризации и выявлении скрытых закономерностей, таких как очаги массовых аварий или критические угрозы безопасности. Логика анализа встроена непосредственно в конвейер обработки каждой входящей заявки, что позволяет системе реагировать на изменения обстановки в режиме реального времени (рисунок 2.1)

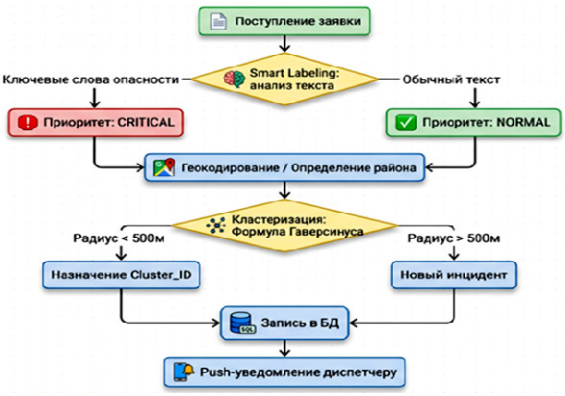



Рисунок 2.1 – Алгоритм автоматизированной обработки входящих заявок

Первым этапом алгоритмической обработки является подсистема интеллектуальной приоритизации, базирующаяся на методах лексического контент-анализа. Программный обработчик производит предварительную очистку и нормализацию текста поступившего обращения, после чего осуществляет сопоставление содержимого с динамическим словарем маркеров критичности. В данный словарь включены термины, указывающие на прямую угрозу жизни и здоровью граждан, а также на обесточивание объектов первой категории надежности электроснабжения, таких как медицинские учреждения и школы. При обнаружении в тексте слов-маркеров, таких как «пожар», «взрыв», «больница» или «искрит», алгоритм мгновенно присваивает заявке статус критического приоритета. Это изменение немедленно отражается в интерфейсе оператора диспетчерской службы энергоснабжения через систему цветовой индикации и звуковых уведомлений, что позволяет перестроить очередь реагирования и направить ресурсы в первую очередь на устранение наиболее опасных аварий .

Параллельно с анализом текстового содержания запускается подсистема геоинформационной обработки и пространственной кластеризации. Данный алгоритм решает проблему дедупликации данных в условиях массовых отключений, когда десятки жителей одного квартала одновременно сообщают об одной и той же неисправности. Математическая модель алгоритма основана на использовании формулы Гаверсинуса, которая позволяет с высокой точностью вычислять кратчайшее расстояние между точками на поверхности сферы по их координатам. При поступлении новой заявки система сканирует массив активных нерешенных инцидентов в базе данных и рассчитывает дистанцию до каждого из них. В случае если в радиусе пятисот метров фиксируется накопление критической массы обращений, стандартно определенной как три и более заявки, система автоматически генерирует уникальный идентификатор кластера и связывает с ним все текущие и последующие обращения из данной локации.

Логическим продолжением процесса кластеризации является визуализация зон аварийности на интерактивной карте. В интерфейсе оператора диспетчерской службы энергоснабжения такие группы заявок отображаются не как отдельные маркеры, а как единые зоны поражения, что позволяет наглядно оценить масштаб технологического нарушения. Такое решение значительно снижает когнитивную нагрузку на пользователя, избавляя его от необходимости вручную сопоставлять адреса и позволяя координировать выезд одной специализированной бригады на весь очаг аварии. Кроме того, алгоритм учитывает временной фактор: если заявка поступает в локацию, где уже зафиксирован активный кластер, она автоматически наследует его параметры и приоритет, что обеспечивает целостность оперативной информации.

Важным аспектом алгоритмического обеспечения является также механизм автоматического геокодирования на основе территориальных справочников. В ситуациях, когда пользовательское устройство не передает точные GPS-координаты, система выполняет трансляцию строковых названий микрорайонов в соответствующие географические точки. Это достигается за счет интеграции с внутренней базой координат центров административных единиц, что гарантирует стопроцентное покрытие всех входящих заявок геоинформационным анализом. Совокупность перечисленных алгоритмов – от лингвистического анализа до тригонометрических расчетов расстояний – формирует интеллектуальную среду, способную эффективно поддерживать принятие управленческих решений в кризисных ситуациях энергоснабжения.

**3 Подсистема планирования фоновых задач и реализация оповещений**

Реализация подсистемы планирования фоновых задач и оповещений является критически важным компонентом программного комплекса, обеспечивающим переход от реактивной модели управления инцидентами к проактивному информированию населения. Основное назначение данного модуля заключается в автоматизации процесса рассылки уведомлений о плановых регламентных работах на электросетях, что позволяет минимизировать негативные последствия для потребителей и снизить нагрузку на операторов диспетчерской службы энергоснабжения в моменты отключений. Технологической основой для построения этой подсистемы стала библиотека APScheduler, интегрированная непосредственно в структуру Flask-сервера, что позволило реализовать надежный механизм управления временными событиями внутри распределенной архитектуры приложения.

Программная логика подсистемы базируется на использовании планировщика фоновых задач BackgroundScheduler, который функционирует в изолированном потоке исполнения, не блокируя обработку входящих HTTP-запросов и работу основного цикла Telegram-бота. Взаимодействие с данными организовано через специализированную таблицу плановых отключений в базе данных PostgreSQL. Каждая запись в этой таблице содержит исчерпывающую информацию о предстоящем событии, включая детальное описание работ, идентификатор целевого административного района и точную временную метку запланированного начала информирования. Наличие статусного поля, фиксирующего факт успешной отправки сообщения, гарантирует отсутствие повторных нежелательных рассылок и позволяет отслеживать состояние очереди задач в режиме реального времени.

Процесс функционирования подсистемы инициируется при запуске сервера, когда вызывается процедура первичного сканирования базы данных. Алгоритм анализирует все невыполненные задачи и сравнивает текущее системное время со временем, указанным в поле запланированной даты. В ситуациях, когда время оповещения уже наступило или было пропущено из-за временной недоступности сервера, система инициирует немедленную рассылку. Для будущих событий планировщик динамически создает задания в оперативной памяти, закрепляя за каждым уникальный идентификатор и устанавливая триггер на выполнение в строго определенный момент. Такой подход обеспечивает высокую точность информирования и позволяет диспетчерскому составу планировать информационные кампании на несколько дней или недель вперед через административный web-интерфейс.

Центральным звеном в цепочке оповещения является функция массовой трансляции сообщений, которая осуществляет выборку целевой аудитории из общего массива пользователей. Алгоритм фильтрует записи в таблице пользователей, выделяя только тех граждан, чья территориальная привязка совпадает с районом проведения плановых работ. Интеграция с Telegram Bot API позволяет выполнять адресную доставку сообщений в формате Markdown, обеспечивая наглядное форматирование текста и использование специальных символов для привлечения внимания пользователей. Для предотвращения сбоев при возникновении сетевых ошибок или в случаях, когда пользователь заблокировал бота, в код встроены блоки обработки исключений, обеспечивающие непрерывность процесса рассылки для остальных участников списка.

Использование неблокирующего ввода-вывода при реализации оповещений имеет стратегическое значение для производительности всей системы. Благодаря тому, что процесс массовой рассылки выполняется в фоновом режиме, программный комплекс сохраняет высокую скорость отклика для всех категорий пользователей даже в моменты пиковой нагрузки, когда уведомления могут отправляться одновременно тысячам абонентов. По завершении цикла рассылки система автоматически обновляет состояние задачи в базе данных, фиксируя время окончания работ и изменяя флаг исполнения. Это создает прозрачную историю проактивного взаимодействия с населением и формирует фундамент для последующего анализа эффективности информирования в рамках ситуационных отчетов.

**4 Информационный обмен между распределенными компонентами программного комплекса**

Спецификация REST API и механизмы межсервисного взаимодействия формируют технологический фундамент, на котором базируется информационный обмен между распределенными компонентами программного комплекса. В рамках выбранной архитектуры прикладной интерфейс выступает в роли универсального посредника, связывающего уровень хранения данных в СУБД PostgreSQL с интерфейсным модулем пользователя.

Основным протоколом передачи данных является HTTP, а в качестве универсального формата представления информации выбран JSON, что обеспечивает высокую скорость парсинга и совместимость с современными JavaScript-фреймворками. Спецификация API включает в себя набор специализированных конечных точек, каждая из которых инкапсулирует определенную область бизнес-логики системы. Группа методов получения информации обеспечивает выгрузку списков инцидентов с поддержкой сортировки по времени создания, что позволяет всегда видеть наиболее актуальные заявки в верхней части списка. При этом серверная часть API выполняет автоматическое обогащение данных, преобразуя идентификаторы пользователей в читаемые строки с указанием района, а также подставляя вычисленные координаты и приоритеты.

Особое значение для функционирования геоинформационного модуля имеет эндпоинт, транслирующий данные в формате GeoJSON. Этот специализированный стандарт представления географических объектов позволяет передавать на сторону клиента не только атрибутивную информацию о заявках, но и их пространственную геометрию. Серверный алгоритм формирует коллекцию объектов, где каждая точка содержит координаты широты и долготы, а также свойства, необходимые для корректной визуализации в библиотеке Leaflet.js, включая цвет маркера в зависимости от статуса и информацию о принадлежности к кластеру массовой аварии. Такой подход позволяет минимизировать объем передаваемого трафика и переложить задачу рендеринга на клиентское устройство, обеспечивая плавность работы интерактивной карты.

Механизмы записи и модификации данных реализованы через POST-запросы, требующие строгой валидации входящих параметров. При обновлении статуса инцидента или создании планового отключения сервер проверяет полноту данных и корректность форматов дат. Интеграция с подсистемой ситуационного анализа происходит прозрачно для внешнего потребителя API: при получении новой заявки сервер автоматически инициирует процедуры лексического анализа и гео-кластеризации до момента фиксации транзакции в базе данных. Кроме того, реализована функциональность экспорта данных, которая генерирует динамические отчеты в формате CSV.

Межсервисное взаимодействие между Flask-сервером и модулем Telegram-бота организовано по гибридной схеме. В то время как сервер обрабатывает запросы от web-интерфейсов, бот выступает в роли исполнительного механизма для доставки уведомлений. Связующим звеном здесь служит общая база данных и событийно-ориентированная модель обмена данными через Telegram Web Apps. Когда пользователь выполняет действие в web-панели, запущенной внутри мессенджера, данные передаются боту через зашифрованный канал, после чего серверный обработчик анализирует тип действия и при необходимости вызывает методы планировщика или рассылки. Такая многоуровневая система интерфейсов обеспечивает целостность логики управления и позволяет программному комплексу функционировать как единая интеллектуальная среда ситуационного анализа.

**5 Организация геоинформационного модуля**

Центральное место в структуре ситуационного анализа занимает геоинформационный модуль. С помощью библиотеки Leaflet.js на интерактивной подложке местности отображаются точные координаты всех зафиксированных инцидентов.

Система автоматически окрашивает маркеры в соответствии с их состоянием, где серый цвет соответствует новым обращениям, а жёлтый – заявкам, принятым в работу. Особое значение для выявления аварийных очагов имеет визуализация кластеров. В ситуациях, когда в радиусе пятисот метров фиксируется накопление заявок, система отрисовывает вокруг них полупрозрачную красную зону, сигнализирующую о массовом характере аварии.

Для проведения углубленного анализа плотности инцидентов и выявления наиболее уязвимых участков анализируемой энергосети в модуле предусмотрен режим тепловой карты. При переключении на этот слой точечные маркеры заменяются градиентными областями, интенсивность цвета которых напрямую зависит от концентрации заявок в конкретной локации. Такой подход позволяет видеть общую картину нагрузки на сеть и принимать предиктивные меры по модернизации оборудования в районах с традиционно высокой частотой отказов. Весь процесс визуализации опирается на серверный API, отдающий данные в формате GeoJSON, что гарантирует высокую производительность карты даже при наличии сотен активных записей.

**6 Модуль аналитики и поддержки принятия управленческих решений**

Аналитическая составляющая программного комплекса сосредоточена в специализированном разделе дашбордов, где с помощью библиотеки Chart.js накопленная информация преобразуется в наглядные диаграммы, сравнивающие аварийность различных участков контролируемого электроэнергетического объекта.

Система в автоматическом режиме рассчитывает ключевые показатели эффективности, такие как:

– среднее время реакции на аварию (от момента подачи заявки до изменения её статуса на значение «В работе»);

– среднее время устранения неисправности по различным категориям проблем;

– сводная статистика аварийности по каждому участку электросети.

Полученная статистика, обработанная с использованием подсистемы программного комплекса «ControlSyst», определяет исходные данные для проведения вероятностно-алгебраического моделирования исследуемой электроэнергетической системы.

**7 Оценка надёжности электроэнергетической системы**

На рисунке 7.1 представлен фрагмент электроэнергетической сети районного центра. Система может быть формализована как в виде графа-трёхполюсника так, и в виде графа-четырёхпоюсника [6].

В качестве характеристик надёжности элементов при оценке надёжности организации участков электроэнергетической системы рассматриваются вероятности отказов, возникающих в ходе доставки электроэнергии, которые описываются векторами:

$$P^i = (p_0^i, p_1^i),\ \sum_{j=0}^{1} p_j^i = 1,\ i = \overline{1,m}. \qquad (7.1)$$

Первые составляющие $p_0^i$ векторов (7.1) определяют вероятность надёжной работы *i*-ых элементов, выделеных в процессе фомализации. Вторые состявляющие $p_1^i$ векторов (7.1) определяют вероятность отказа работы *i*-ых элементов системы.

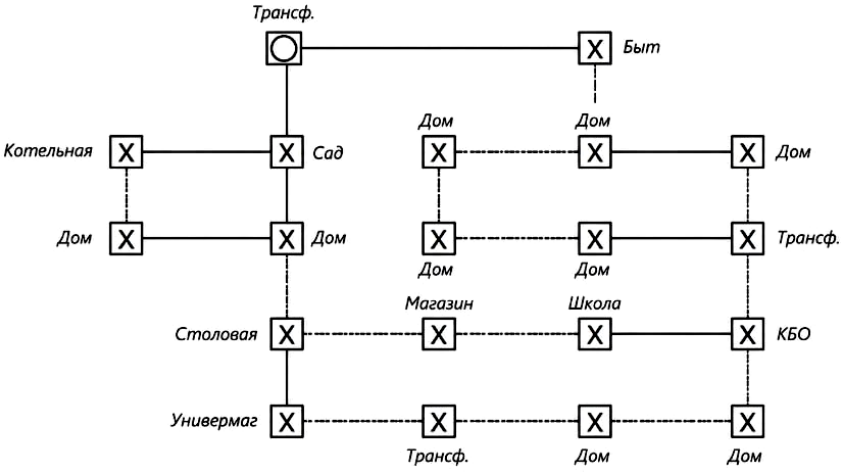



Рисунок 7.1 – Схема фрагмента электроэнергетической сети

Формализуем фрагмент в виде графа-трёхполюсника. При исследовании системы с тремя терминальными вершинами ставится задача определения вектора вероятностей состояний надёжности, который имеет вид:

$$P^s = (p_1^s, p_2^s, ...p_5^s),\ \sum_{j=1}^{5} p_j^s = 1.$$

На рисунке 7.2 фрагмент сети представлен в виде графа $G(N,K)$, где $N = \{N_v\}$, $v = \overline{1,20}$, $K = \{K_i\}$, $i = \overline{1,23}$. В качестве терминальных вершин выступают два входа $N_2, N_4 \in N$ и один выход $N_{18} \in N$.

Исходные данные (7.1) выбраны в рабочей точке области определения параметров элементов, выделенных в процессе формализации объекта исследования (таблица 7.1).

Для элементов графа, представленного на рисунке 7.2, использовались исходные данные вероятностей работы элементов электроэнергетической сети (рисунок 7.1), приведенные в таблице 7.2.

Таблица 7.1– Показатели надежности элементов электроэнергетической системы

| Элемент электроэнергетической системы | Вероятностный показатель работы элемента | Вероятностный показатель отказа элемента |
|---|---|---|
| Трансформатор | 0,9000 | 0,1000 |
| Потребитель электроэнергии 1 типа | 0,8730 | 0,1270 |
| Потребитель электроэнергии 2 типа | 0,9685 | 0,0315 |
| Потребитель электроэнергии 3 типа | 0,9000 | 0,1000 |
| Линия электропередачи воздушная | 0,9625 | 0,0375 |
| Линия электропередачи подземная | 0,9910 | 0,0090 |

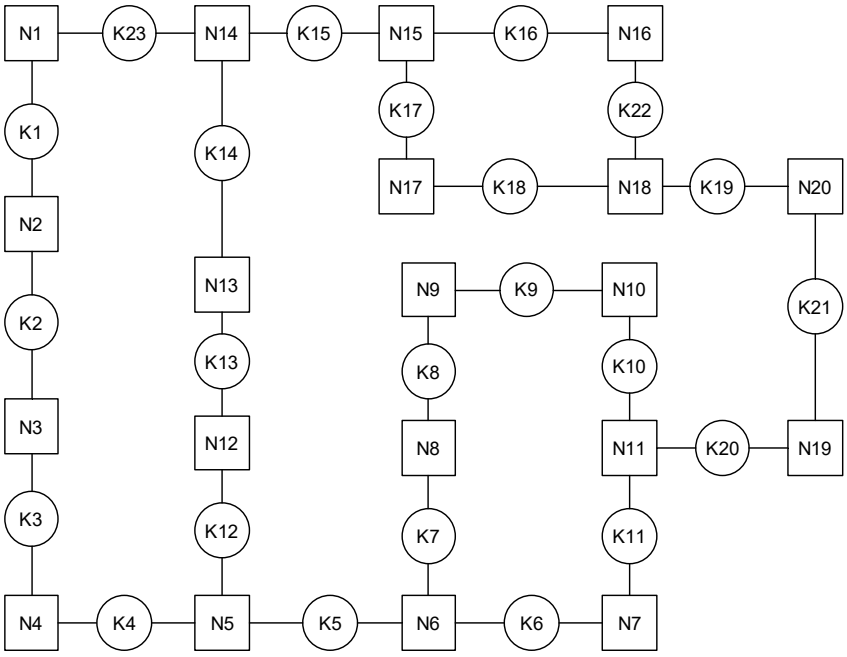



Рисунок 7.2 – Граф модели фрагмента электроэнергетической сети, формализованной в виде графа-трёхполюсника

Таблица 7.2 – Показатели надежности элементов-вершин графа модели электроэнергетической системы

| Элемент | Надежность | Элемент | Надежность | Элемент | Надежность | Элемент | Надежность |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $N_1$ | 0,8730 | $N_6$ | 0,9000 | $N_{11}$ | 0,9000 | $N_{16}$ | 0,9000 |
| $N_2$ | 0,9000 | $N_7$ | 0,8730 | $N_{12}$ | 0,8730 | $N_{17}$ | 0,8730 |
| $N_3$ | 0,9685 | $N_8$ | 0,9000 | $N_{13}$ | 0,8730 | $N_{18}$ | 0,9000 |
| $N_4$ | 0,9000 | $N_9$ | 0,9685 | $N_{14}$ | 0,9000 | $N_{19}$ | 0,8730 |
| $N_5$ | 0,9685 | $N_{10}$ | 0,9000 | $N_{15}$ | 0,8730 | $N_{20}$ | 0,8730 |

Таблица 7.3 – Показатели надежности элементов-ребер графа модели электроэнергетической системы

| Элемент | Надежность | Элемент | Надежность | Элемент | Надежность | Элемент | Надежность |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $K_1$ | 0,9625 | $K_7$ | 0,9625 | $K_{13}$ | 0,9625 | $K_{19}$ | 0,9910 |
| $K_2$ | 0,9625 | $K_8$ | 0,9625 | $K_{14}$ | 0,9625 | $K_{20}$ | 0,9910 |
| $K_3$ | 0,9625 | $K_9$ | 0,9625 | $K_{15}$ | 0,9625 | $K_{21}$ | 0,9910 |
| $K_4$ | 0,9625 | $K_{10}$ | 0,9625 | $K_{16}$ | 0,9625 | $K_{22}$ | 0,9910 |
| $K_5$ | 0,9910 | $K_{11}$ | 0,9910 | $K_{17}$ | 0,9910 | $K_{23}$ | 0,9910 |
| $K_6$ | 0,9910 | $K_{12}$ | 0,9910 | $K_{18}$ | 0,9910 | | |

Вероятностные показатели надежности приведены для вершин, что в свою очередь означает оценку надежности электроэнергетической системы со схемой формализации «элементы-вершины» [1].

В таблице 7.3 приведены вероятности надежной работы линий связи (ребер графа модели электроэнергетической системы), которые использовались для оценки надежности электроэнергетической системы, формализованной по схеме «элементы – ребра».

Результаты моделирования фрагмента электроэнергетической системы для двух схем формализации представлены в таблице 7.4 (схема формализации «элементы – вершины») и таблице 7.5 (схема формализации «элементы – рёбра»).

Таблица 7.4 – Результаты моделирования фрагмента электроэнергетической системы для схемы формализации «элементы – вершины»

| Состояния системы | Вероятностные оценки |
|---|---|
| Состояние $S_1$ | 0,0000067579689588000 |
| Состояние $S_2$ | 0,0000276652821192000 |
| Состояние $S_3$ | 0,0000165545896312000 |
| Состояние $S_4$ | 0,0306100042564110000 |
| Состояние $S_5$ | 0,9693390179028800000 |

Таблица 7.5 – Результаты моделирования фрагмента электроэнергетической системы для схемы формализации «элементы – рёбра»

| Состояния системы | Вероятностные оценки |
|---|---|
| Состояние $S_1$ | 0,0000423908958435058 |
| Состояние $S_2$ | 0,0002661804612979000 |
| Состояние $S_3$ | 0,0024654047857418900 |
| Состояние $S_4$ | 0,0081481095264200000 |
| Состояние $S_5$ | 0,9890779143307000000 |

Полученные оценки вероятностей результирующих состояний надёжности фрагмента электроэнергетической системы представляют собой целый вектор вероятностей состояний надёжности объекта исследования, что является более информативным при выборе проектного решения для электроэнергетических объектов ограниченной размерности. При рассмотрении систем большой размерности, полученные результаты моделирования могут служить исходными данными, позволяющими реализовать вероятностно-алгебраическое умножение структур ($n$-полюсников) [7].

**Заключение**

Для выбора надёжного варианта организации электроэнергетического объекта предлагается воспользоваться вероятностно-алгебраическим моделированием, позволяющим построить модели с учетом числа элементов, структурной организации объекта и числа входов / выходов.

Объединение программного комплекса пространственно-временного анализа данных и инструментария вероятностно-алгебраического моделирования при исследовании надёжности электроэнергетических объектов позволит распределить все элементы по иерархическим уровням и интегрировать их в единую систему сбора, обработки и анализа данных, тем самым повысить эффективность управления объектами исследования и обеспечить решение следующих задач:

– организацию и автоматизацию оперативного мониторинга за состоянием надежности структурных элементов объекта;

– классификацию состояний и формирования вероятностных оценок надёжности как отдельных элементов, так и всего объекта;

– определение оптимального сочетания параметров надёжности элементов объекта, обеспечивающих заданный уровень надёжности организации электросети без изменения её структурной организации;

– оценки вариантов модификации структуры объекта по заданному критерию с использованием приемлемых по вычислительной сложности алгоритмов.

Кроме этого программный комплекс пространственно-временного анализа данных может использоваться и как самостоятельное инструментальное средство, позволяющее существенно сократить время реакции диспетчерских служб поставщиков электроэнергии на критические аварии и повысить уровень информированности граждан о состоянии энергоснабжения. Использование интерактивных тепловых карт и

аналитических дашбордов в составе комплекса позволит реализовать переход от реактивной модели фиксации аварий к проактивному управлению ресурсами восстановления работоспособности аварийных участков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сукач*, *Е. И.* Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры / Е. И. Сукач. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 224 с.

2. *Анализ надёжности электроэнергетических систем на основе вероятностно-алгебраического моделирования* / О. М. Демиденко, Е. И. Сукач, Д. В. Ратобыльская, Ю. В. Жердецкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2 (13). – С. 87–94.

3. *Программно-технологический комплекс автоматизации проектного моделирования систем управления технологическими процессами производства с элементами потенциальной опасности* «*ControlSyst*»: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 773 / Е. И. Сукач, Ю. В. Жердецкий. – Мн. : НЦИС, 2015. – Заявка № С20150031. – Дата подачи: 15.04.15.

4. *Калиниченко*, *В. А*. Управление оповещениями об отключениях электроэнергии с использованием TELEGRAM-БОТА / В. А. Калиниченко // «Творчество Молодых – 2025»: сб. науч. работ студентов и аспирантов УО «ГГУ им. Ф. Скорины». – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины. – 2025. – Ч. 1. – С. 183–186.

5. *Гринберг*, *М*. Разработка приложений с использованием Flask / М. Гринберг. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 272 с.

6. *Об одном подходе к оценке надёжности сетевых структур* / Е. И. Сукач, Д. В. Ратобыльская, С. Ф. Маслович, Т. Я. Каморникова // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 4 (13). – С. 87–94.

7. *Сукач*, *Е. И.* Метод вероятностно-алгебраического моделирования надёжности структурно-сложных систем большой размерности / Е. И. Сукач // Математические машины и системы. – 2014. – № 1. – С. 195–200.

*Поступила в редакцию* 29.06.2026.

**Информация об авторах**

*Сукач Елена Ивановна* – к.т.н., доцент
*Калиниченко Вячеслав Александрович* – студент