

УДК 004.9, 004.415.2

doi 10.54708/19926502_2025_29411072

Информационная система планирования технического обслуживания и ремонта инженерных систем

Э.И. Кальметьев^{1*}, А.Е. Сергеева², Ш.М. Минасов¹, Т.В. Мухамадеев¹

¹ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ), г. Уфа, Россия

²Международный аэропорт «Уфа», Булгаково, Россия

Аннотация. Грамотное планирование технического обслуживания и ремонта систем жизнеобеспечения зданий и сооружений массового пребывания людей является залогом сохранения их жизни и здоровья в условиях возникновения нештатных ситуаций. В работе предлагается решение задачи планирования работ по ТОиР инженерных систем зданий архитектурно- и инфраструктурно-сложных объектов. Выполнен анализ существующих подходов и программных решений, выявлены их ограничения и недостатки. Приведены разработанные функциональная и информационная модели процесса планирования ТОиР, алгоритмы работы системы формирования эффективных планов обслуживания, описаны архитектура разработанной информационной системы, обеспечивающей автоматизированное формирование планов обслуживания с учетом пространственных и временных ограничений, построение маршрутов обслуживания на планах здания, приведены экранные формы реализованной системы для планирования, выполнения и контроля выполненных работ в процессе проведения ТОиР.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, инженерные системы, системы жизнеобеспечения зданий, планирование работ, внутриобъектовая навигация, визуальное отображение перемещения в многоуровневых пространствах.

*kalmetev.emil@yandex.ru

Введение

Обеспечение комфортного и безопасного нахождения на объектах массового скопления людей осуществляется множеством инженерно-техническим систем, таких как системы электроснабжения, вентиляции, кондиционирования, пожарной сигнализации, пожаротушения, водоснабжения, внутренней связи и т.п., которые представляют собой сложную систему жизнеобеспечения зданий.

Современные требования заказчика к дизайну и архитектуре, отсутствие свободных площадей в густонаселенных городах, сохраняющиеся тенденции к расположению объектов массового посещения людей в местах их максимальной плотности проживания, приводят к появлению зданий и их комплексов, в которых из-за отсутствия ровных горизонтальных площадок под строительство используется любая свободная или освобожденная от застроек территория. Многоэтажные здания, построенные на таких площадях, часто не имеют общих внешних стен, каждый уровень имеет собственную внутреннюю геометрию, не похожую на другие уровни, межэтажные переходы располагаются в разных местах, равно как и переходы между зданиями – на разных уровнях. Нередко уровни здания имеют отрицательную нумерацию этажей, расположенных ниже нулевой отметки относительно центрального входа.

И если проектирование и монтаж систем жизнеобеспечения таких зданий сами по себе являются нетривиальными задачами, то последующее техническое обслуживание и ремонт инженерных систем также требуют особого внимания, а также постоянных тренировок персонала по правилам поведения в условиях нештатных ситуаций, изучения маршрутов эвакуации, уникальных для каждого уровня.

Часто проблемы идентификации нештатных ситуаций в зданиях связаны не только с отсутствием систематического подхода к планированию ТОиР, но и, порой, невнимательностью к деталям. Большое количество оборудования, периодические изменения во внутренней планировке зданий, большие площади и сложная внутренняя топология, изменения в назначении отдельных помещений и т.п. усложняют планирование и выполнение регламентных работ по обслуживанию. Особенно это актуально в случаях, когда изменения либо вовсе не фиксируются в документации, либо фиксируются некорректно, что приводит к увеличению времени на поиск места возникновения сигнала нештатной ситуации, неисправного оборудования и ухудшению взаимодействия между различными инженерными службами [1].

Проблемы обнаружения отдельных элементов систем, местоположение которых изменилось, но неправильно или вовсе не отражено в технической документации, как следствие, приводят к отсутствию срабатывания при возникновении нештатной ситуации, либо к ложным срабатываниям, что особенно критично, например, для систем пожарной безопасности. Ложное срабатывание или, наоборот, отсутствие срабатывания при наличии на то объективной причины может быть вызвано запылением датчиков, неправильным их положением из-за перепланировки других инженерных систем, нарушениями в работе линий связи или нестабильной работой ПО. Частые ложные тревоги увеличивают риск пропуска факта возникновения реальных угроз, либо ведут к финансовым потерям из-за вынужденных эвакуаций, либо штрафов при выявлении несоответствия контролирующими органами.

Немаловажную роль в процессах выполнения ТОиР имеет человеческий фактор, когда специалисты недостаточно скрупулезно и своевременно вносят изменения в фактическую структуру систем жизнеобеспечения, либо не имеют возможности вносить их из-за отсутствия соответствующих информационных систем, либо реальные нештатные ситуации происходят до момента внесения таких корректировок. Изменение штатного состава ИТР и прием на работу новых сотрудников в условиях текучки кадров также усложняет проблему времени реагирования на возникновение нештатных ситуаций. Так, например, в 2021 году при задымлении первого этажа университета не была произведена эвакуация. При этом датчики и сама система пожарной сигнализации сработали. Отсутствие голосового оповещения о необходимости эвакуации произошло из-за того, что двумя годами ранее специалистом системы ОПС эта функция была «временно отключена» из-за ложных срабатываний при выполнении строительно-монтажных работ, но не включена, потому что отключивший ее сотрудник к тому времени уволился. К сожалению, нередко такая халатность приводит к трагическим событиям [2].

Отметим, что в случаях возникновения реальных нештатных ситуаций, связанных с угрозой жизни и здоровью людей в местах их массового скопления, требуется немедленное реагирование, а поиск источника аварии не должен зависеть от опыта и квалификации сотрудника. Каждая потеряянная минута может привести к человеческим жертвам, либо материальному ущербу, репутационным потерям и иным формам ущерба.

Термины и определения

Организационно-техническая система (ОТС) – это человеко-машинная система, где организационная подсистема (люди) и техническая подсистема (оборудование, инженерные системы, компьютеры и др.) согласованно взаимодействуют для обеспечения надежного функционирования и устойчивого развития объекта [3].

Сложная организационно-техническая система (СОТС) – это искусственная самоорганизующаяся, динамическая совокупность взаимосвязанных элементов, предназначенных для производства продукции, предоставления услуг или иной деятельности, осуществляющей человеком [4]. СОТС характеризуются множеством признаков, таких как: многоаспектность и неопределенность поведения системы; территориальная распределенность; уникальность иерархических связей; подобие, с одной стороны, и избыточность из-за дублирования возможностей подсистем, с другой, вариативность связей между ними и способов реализации функ-

ций управления. Примерами таких систем являются: системы авиационного, железнодорожного и морского транспорта; большие торговые комплексы, предоставляющие в аренду собственные помещения; академгородки вузов, межвузовские лаборатории и кампусы и т.п.

Архитектурно-сложный объект – это сооружение, при строительстве которого возникают сложные инженерные задачи, нехарактерные для типовых решений. Такие объекты часто требуют разработки новых технологий и применения инновационных материалов.

Инфраструктурно-сложный объект – это здание или сооружение, обладающее сложной инженерной инфраструктурой. Такие объекты требуют высокой степени координации и взаимодействия всех систем для обеспечения их бесперебойной и безопасной работы [5].

Нештатная ситуация – это любое отклонение состояния объекта управления от требований нормативно-технической документации, способное привести к угрозе жизни и здоровью людей, повреждению или уничтожению имущества либо нарушению устойчивой работы инфраструктуры [6]. Такие ситуации могут возникать внезапно и требуют оперативного реагирования. К непредвиденным ситуациям относятся аварии, пожары, технологические сбои, кибератаки и иные причины, ведущие к нарушению штатного функционирования объекта.

Анализ предметной области

Среди множества непредвиденных ситуаций наибольшее внимание в публикациях уделяется пожарам, поскольку именно они наносят непоправимый ущерб жизни и здоровью людей, имуществу; помимо больших экономических потерь от самого пожара, ликвидация его последствий также требует больших затрат. Однако значительный ущерб наносят и меры по парированию несоставившихся пожаров. Опубликованный в [7] анализ демонстрирует, что большинство срабатываний систем пожарной сигнализации за исследуемый период являлись ложными. Частыми причинами ложных срабатываний являются: запыление, особенно во время выполнения локальных строительно-ремонтных работ; нарушение правил техники безопасности на рабочем месте; пар и дым при приготовлении и разогреве пищи; курение в неустановленных местах; нарушение регламентов технического обслуживания и др.

Стоит отметить, что изменения в планировке зданий делают привычные маршруты обслуживания неактуальными. Оборудование, установленное стационарно, перемещение к которому производилось по ранее утвержденному маршруту, может оказаться недоступным из-за перемещения межкомнатных перегородок. Инженеру, неинформированному о таких изменениях, приходится тратить время на поиск оборудования и доступ к нему, тратить время на обход препятствий, в то время как маршрут для доступа к нему мог быть заранее актуализирован, будь об этом известно.

Сложность в определении местоположения источника информации о срабатывании систем пожарной безопасности критична при возникновении реальных угроз. СОТС, в которых взаимодействуют персонал и инженерная инфраструктура, должны быстро адаптироваться к изменяющейся топологии объекта. Устаревшие планы и маршруты замедляют реакцию на инциденты, что может иметь серьезные последствия. Каждая лишняя эвакуация – это не только значительные экономические потери бизнеса, арендующего помещения, но и издержки собственника здания, а также его репутационные потери и отток арендаторов, а задержки в запуске алгоритмов обеспечения безопасности ведут к неоправданным рискам, а часто и к непоправимым последствиям [2].

Существующие подходы и программные средства

Обзор программно-аппаратных решений в области жизнеобеспечения зданий, сооружений и комплексов показал, что на рынке инженерных систем существует достаточное количество конкурирующих решений как для осуществления контроля состояния объектов, так и для сопровождения ТОиР, обеспечивающих их качественное техническое обслуживание с учетом соблюдения требований технической документации.

Однако реализуемые в них планы расположения оборудования, датчиков, средств коммуникации чаще всего условны, и в зданиях, в которых периодически изменяется назначение

функционирования отдельных помещений и площадей, их актуализация и оценка рисков не производится. В качестве примера можно привести мероприятия, когда в выставочных комплексах, учебных заведениях или торговых центрах организуются временные пространства для проведения мероприятий с массовым посещением людей, не знакомых со схемой здания, не учитывается и временное зонирование, и изолирование от внешнего пространства (в целях ограничения доступа к иным помещениям), при этом не учитывается вероятная возможность возникновения непредвиденных ситуаций, не производится оценка рисков и не вносятся изменения в схемы организации путей эвакуации.

Необходимость своевременного выполнения ТОиР, быстрого реагирования в непредвиденных ситуациях, временного или периодического изменения назначения и устройства отдельных помещений и территорий, а также текучка кадров собственного персонала и привлечение сторонних инженеров для обслуживания систем на основе договоров аутсорсинга требуют разработки системы информационной поддержки принятия решений и планирования работы инженерных служб, обеспечивающей максимально быстрое реагирование на любые ситуации на объекте, несмотря на возможное отсутствие у них информации о внутренней топологии здания или об изменениях его конфигурации.

Применение предлагаемой системы предполагает значительное сокращение затрат на актуализацию цифровой модели объектов, что, в свою очередь, упростит процесс поддержки работоспособного состояния и своевременное устранение неисправностей систем жизнеобеспечения зданий за счет точной локализации мест, идентификации причин сбоев и аварий, а также снижения издержек от ложных срабатываний систем оповещения.

На отечественном рынке в настоящее время существуют системы для контроля состояния инженерных систем, в том числе на основе технологий искусственного интеллекта, но они не решают задач эффективного выполнения ТОиР и не предусматривают поиска оптимального их выполнения. Хотя существующие системы, применяемые в системах жизнеобеспечения зданий, позволяют увидеть места срабатывания датчиков на планах зданий, о причинах их срабатывания остается лишь догадываться, так как на схеме будет показана только та система, которая сработала. Никакой дополнительной информации о нахождении в помещении чего бы то ни было инженер (в том числе ранее там не бывавший и специально не информированный) не получит; он не увидит расположение в данной зоне оборудования других инженерных систем и их текущего состояния. В результате персонал вынужден полагаться на личный опыт специалистов и не очень удобные в работе бумажные или отсканированные схемы, которые часто содержат неактуальную информацию, что увеличивает время решения задач [8].

Анализ текущей ситуации на рынке показывает, что существующее программное обеспечение не в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к оперативному планированию ТОиР. Сравнительный анализ существующих систем ТОиР [9] и разрабатываемого решения показывает, что предлагаемая система объединяет многие функции аналогов и дополнительно предлагает уникальные возможности. Так, в отличие от систем «1С: ТОиР», ИСО «Орион» и «АСМО ТОиР», разрабатываемое решение включает функции визуализации всех установленных на объекте инженерных систем, а также поиск кратчайшего маршрута к искомому элементу.

В настоящей работе описывается решение, которое:

- реализует отображение всех инженерных систем и их элементов на планах здания;
- обеспечивает отображение мест установки оборудования по его идентификатору;
- позволяет вести планирование ТОиР на основе цифровой модели объекта с учетом построения оптимальных маршрутов перемещения, а также времени доступности помещений;
- строит оптимальный маршрут перемещения к точке возникновения инцидента для его своевременной локализации и идентификации непредвиденной ситуации, с целью принятия решения о целесообразности и необходимости запуска алгоритмов эвакуации.

Методы представления и сбора данных для планирования ТОиР

Для построения эффективной системы планирования ТОиР инженерных систем инфраструктурно-сложных объектов необходимо обеспечить структурированное представление оборудования, включающее его технические характеристики и регламенты обслуживания, а также привязку каждого объекта к конкретному помещению, уровню и координатам. Важно учитывать ограничения по доступу в помещения и особенности их эксплуатационных режимов, а также обеспечивать хранение истории выполненных работ и зарегистрированных нештатных ситуаций, что позволяет формировать актуальную картину состояния инженерной инфраструктуры.

Источниками данных являются проектная и исполнительная документация, паспорта оборудования, журналы технической эксплуатации, базы данных существующих информационных систем (СКУД, системы мониторинга, учетные системы ТОиР). Важной задачей является консолидация разрозненной информации в единой базе данных, содержащей все необходимые атрибутивные сведения о каждом компоненте системы (тип, модель, регламент обслуживания) и их пространственную привязку (уровень, помещение, координаты).

Для описания внутренней топологии архитектурно-сложного объекта применяется граф, узлы которого соответствуют ключевым точкам (помещениям, переходам, лестничным клеткам, техническим помещениям), а ребра отражают возможные маршруты перемещения. Архитектурная модель здания является основой для описания инженерных систем. Элементы инженерных систем могут быть привязаны к конкретным помещениям либо физическим координатам, когда положение элементов остается неизменным при внутренней трансформации помещений. Привязка элементов инженерных систем к архитектурным планам позволяет строить оптимальные маршруты перемещения к ним из любой точки здания по маршрутам, доступным для каждого конкретного пользователя системы [10], а также находить оптимальные маршруты обхода объектов обслуживания без возврата в исходную точку.

В случае отсутствия актуальной информации о расположении оборудования либо при изменении назначения помещений или трансформации внутреннего пространства на временной или постоянной основе, информация собирается непосредственно на месте и фиксируется в базе данных. Это создает определенную проблему с актуализацией сведений, существующих на бумаге и в электронном виде на исходных платформах, доверять которым в будущем будет все сложнее и сложнее, но, если этого не делать, то не будет ни одной системы, в которой информация об объекте будет достоверной.

Функциональная модель процесса планирования ТОиР

Контекстная диаграмма функциональной модели для решения задачи выполнения ТОиР инженерных систем зданий архитектурно- и инфраструктурно-сложной внутренней организации представлена на Рис. 1.



Рисунок 1. Контекстный уровень функциональной модели.

Декомпозиция, модели (Рис. 2), описывает основные функции разработанной информационной системы, обеспечивающей обработку данных об оборудовании, анализ текущего состояния инженерной инфраструктуры и формирование планов обслуживания.

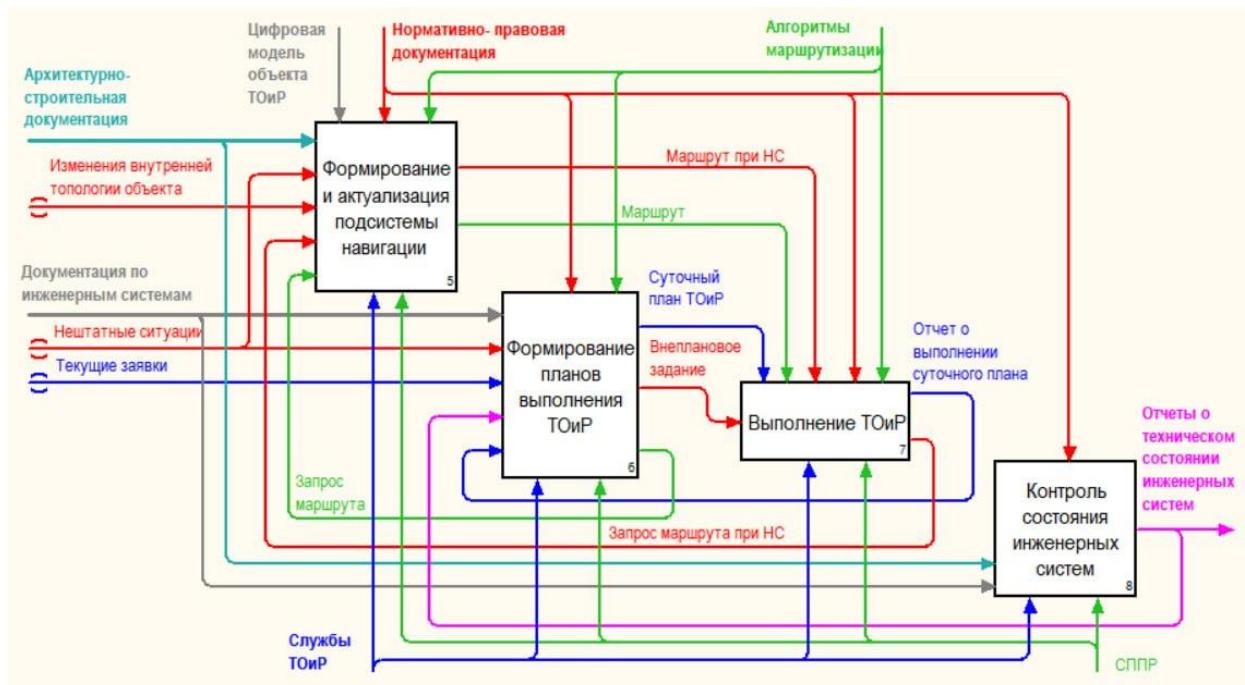


Рисунок 2. Декомпозиция контекстного уровня функциональной модели.

Реализуемый подход способствует снижению эксплуатационных затрат при повышении надежности систем и росте эффективности работы обслуживающего персонала за счет исключения ошибок при планировании ТОиР.

Функциональная модель процесса предусматривает актуализацию цифровой модели здания и данных о составе инженерных систем его жизнеобеспечения, обработку данных о регламенте обслуживания, данные о всех нештатных срабатываниях. На основе собираемых

сведений формируются задания как на техническое обслуживание, так и выполнение внеплановых работ, связанных с различными сбоями и отказами оборудования, авариями, запланированными работами по трансформации внутреннего пространства и другими причинами.

На основе анализа состава оборудования и сведений о его состоянии система определяет перечень и оптимальную последовательность перемещения инженера при выполнении работ по ТОиР в виде планового задания на рабочий день.

Сформированные задания, маршруты и результаты выполненных работ фиксируются в базе данных и передаются пользователям через веб-интерфейс. Таким образом, функциональная модель отражает взаимодействие цифровой топологии, регламентов, модуля маршрутизации и подсистемы учета, обеспечивая автоматизацию ключевых процедур планирования ТОиР и повышение эффективности работы персонала.

Архитектура информационной системы

Архитектура программно-аппаратного решения представлена на Рис. 3. Система построена в формате классической клиент-серверной архитектуры с выделенным сервером базы данных. Клиентский интерфейс пользователя реализован в виде веб-приложения, отображаемого в любом современном браузере [11]. Пользовательский интерфейс предоставляет возможность просмотра и формирования планов ТОиР, базы данных оборудования, управления ресурсами предприятия и создания заявок на добавление новых объектов.

В системе реализована интеграция с модулем маршрутизации, обеспечивающим инженерно-технический персонал оптимальными маршрутами для обслуживания. Также предусмотрена возможность интеграции с системами мониторинга ИС, что позволит получать информацию о состоянии оборудования в режиме реального времени [12].



Рисунок 3. Архитектура системы.

Модель данных информационной системы

Информационная модель базы данных представлена на Рис. 4. Газа данных включает совокупность сущностей, обеспечивающих хранение нормативно-технической, эксплуатационной и пространственной информации об инженерных системах здания.

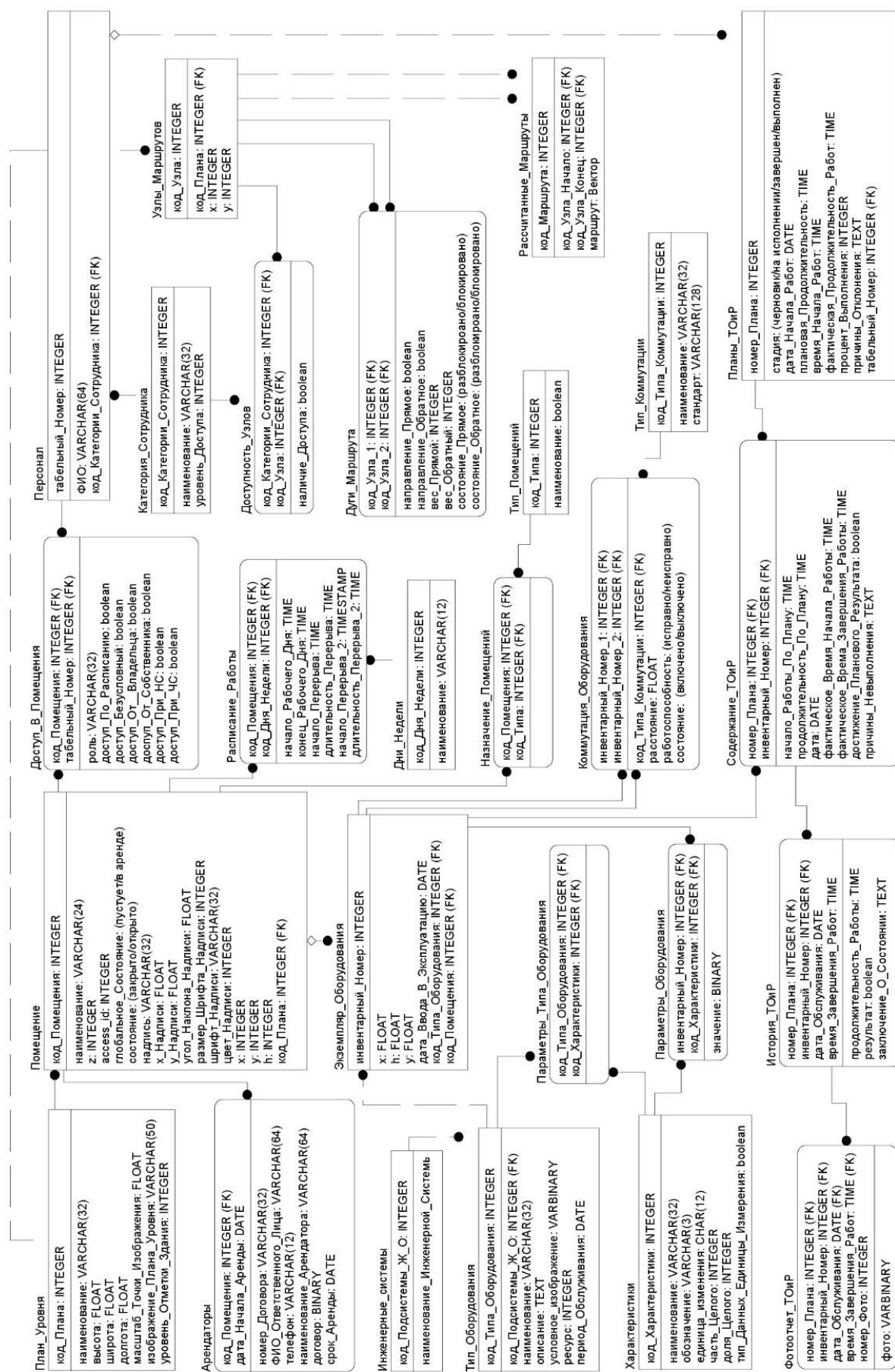


Рисунок 4. Фрагмент логико-физической модели данных.

Таким образом, модель данных формирует целостное представление об объекте эксплуатации, объединяя технические характеристики оборудования, структуру здания и процессы его обслуживания, и служит основой для функционирования алгоритмов планирования и маршрутизации в рамках информационной системы.

Реализация информационной системы

На основании разработанных моделей реализована программно-аппаратная платформа, обеспечивающая решение задачи управления состоянием инженерных систем жизнеобеспечения инфраструктурно- и архитектурно-сложных объектов.

В качестве программных инструментов реализации системы использован комплекс технологий, применяемых для разработки интернет/интранет решений. В условиях штатной эксплуатации доступ к системе обеспечивается только внутри локальной либо корпоративной сети. При необходимости доступ к системе может быть предоставлен через интернет, при этом необходим сервер с «белым» ip-адресом и применением соответствующих программно-аппаратных средств защиты от несанкционированного доступа.

Пользовательский интерфейс разработан на основе технологий разметки HTML5 и CSS3. Интерактивные элементы, недоступные в них, разработаны на языке программирования JavaScript, доступном во всех современных браузерах. Критически важный код и динамическая генерация страниц осуществляются серверной частью приложения, разработанной на языке PHP без применения сторонних фреймворков, что исключает возможность атаки на сетьевую инфраструктуру через локальную сеть. Вся информация, необходимая для работы приложения, хранится в СУБД MariaDB, доступ к базе данных в которой осуществляется только для серверной части приложения, построенной на микросервисной архитектуре.

На Рис. 5 представлена одна из форм интерфейса инженера ПТО, обслуживающего систему оповещения при пожаре. Справочник оборудования содержит полный список оборудования, датчиков и иных элементов, входящих в состав системы пожарной сигнализации. Для каждого элемента указываются дата ввода в эксплуатацию, срок службы, место установки, остаточный ресурс до замены или проведения технического обслуживания и предельный срок, до истечения которого должно быть проведено техническое обслуживание или замена.

Инженерная система	Тип оборудования	Номер	Изображение	Схема подключения	Срок службы	Дата установки	Уровень	Помещение	Осталось до обслуживания	Дата обслуживания
Система ПБ	Извещатель пожарный автоматический дымовой	19-4		—	10 лет	2025-06-03	-2		4%	30.11.2025
Система ПБ	Извещатель пожарный автоматический дымовой	18-4		—	10 лет	2025-06-03	-2		4%	30.11.2025
Система ПБ	Извещатель пожарный автоматический дымовой	17-4		—	10 лет	2025-06-03	-2		4%	30.11.2025

Рисунок 5. База данных оборудования.

При срабатывании системы сигнализации, в базе данных предусмотрена возможность поиска соответствующего датчика по его идентификатору в системе оповещения о пожаре, а также отображение его на плане здания.

Математическая модель формирования плана обслуживания

Задача поиска оптимального маршрута обслуживания объектов инженерных систем рассматривается как обобщенная задача коммивояжера. Маршрутный граф доступных перемещений объекта, изначально отфильтрованный по правам доступа инженера, дополняется вершинами и дугами графа инженерной системы, где вершинам соответствуют объекты обслуживания – целевые точки маршрута, а дугам – перемещения между ними. Дополнительно при объединении маршрутного графа и графа оборудования задаются дуги от крайних узлов обслуживания к ближайшим точкам маршрутного графа.

Пусть имеется исходный взвешенный граф

$$G = (V, E, \omega), \quad (1)$$

где V представляет собой множество вершин графа ($V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\}$); E – множество ребер графа ($E = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V, i \neq j\}$); ω – вес ребра (расстояние) графа, причем $\omega(v_i, v_j) > 0, \forall (v_i, v_j) \in E$.

Вес ребра задается временем перемещения между вершинами. Кроме того, вес ребра, оканчивающегося вершиной, соответствующей объекту обслуживания, увеличивается пропорционально времени, необходимому для обслуживания данного узла.

Начальная вершина $v_{start} \in V$, конечная вершина $v_{end} \in V$, а также набор обязательных промежуточных точек (объектов обслуживания), обязательных для посещения, описываются множеством:

$$V_{mandatory} = \{v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{mk}\}, \quad V_{mandatory} \subseteq V / \{v_{start}, v_{end}\}. \quad (2)$$

Задача поиска оптимального маршрута сводится к решению известной обобщенной задаче коммивояжера (Generalized Traveling Salesman Problem, GTSP) и решается с применением алгоритма Дейкстры и динамического программирования.

Пусть имеется набор кластеров точек маршрута, представляющих собой массивы узлов маршрутного графа

$$C = \{C_0, C_1, \dots, C_M, C_{M+1}\}, \quad (3)$$

где $C_0 = \{v_{start1}, v_{start2}, \dots, v_{startN}\}$ – кластер кандидатов начальной точки; $C_{M+1} = \{v_{end1}, v_{end2}, \dots, v_{endN}\}$ – кластер конечной точки; C_1, C_2, \dots, C_M – кластеры обязательных точек, в каждой из которых имеется одна или несколько альтернативных вершин-кандидатов после фильтрации.

Целевая функция задачи GTSP формируется следующим образом

$$Z = \sum_{(v_i, v_j) \in X} \omega(v_i, v_j) \cdot x(v_i, v_j) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $x \in \{0,1\}$ – бинарная переменная: 1, если переход от узла v_i к v_j включен в маршрут, иначе – 0.

Ограничения:

1) маршрут должен начинаться в одном из узлов-кандидатов кластера начальной точки

$$\sum_{v_i \in C_0} \sum_{v_j \in V'} x(v_i, v_j) = 1; \quad (5)$$

2) если в постановке задачи определен конечный кластер, маршрут обязан завершаться в одном из его узлов:

$$\sum_{v_i \in V'} \sum_{v_j \in C_{M+1}} x(v_i, v_j) = 1; \quad (6)$$

3) каждому промежуточному кластеру (исключая начальный и конечный, если они заданы) должно соответствовать ровно одно посещение одного из его узлов кандидатов

$$\sum_{v_i \in C_k} \left(\sum_{v_j \in V'} x(v_i, v_j) + \sum_{v_j \in V'} x(v_j, v_i) \right) = 2, \forall k = 1, \dots, M; \quad (7)$$

4) для каждого узла маршрута, кроме начального и конечного, число входящих дуг равно числу исходящих. Это гарантирует связность маршрута без разрывов и тупиков

$$\sum_{v_j \in V'} x(v_j, v_i) = \sum_{v_j \in V'} x(v_i, v_j) = 1, \forall v_i = V' \setminus (C_0 \cup C_{M+1}). \quad (8)$$

Алгоритмы функционирования системы

При планировании работ по техническому обслуживанию системы выбираются компоненты, подлежащие обслуживанию в порядке сортировки по deadline на заданный период. Определяется оптимальный маршрут обхода, оценивается общее время его прохождения с учетом времени обслуживания каждого объекта обслуживания системы и времени перехода между ними.

Из этого списка формируется суточный план работ, обеспечивающий минимальные затраты времени на перемещение инженера, и исключаются объекты, доступ к которым в рабочее время не возможен. Маршрут перестраивается до тех пор, пока часть общего маршрута не будет укладываться в рабочее время инженера таким образом, чтобы все запланированные к обслуживанию объекты были доступными. Укрупненный алгоритм формирования суточного плана приведен на Рис. 6.



Рисунок 6. Укрупненный алгоритм планирования ТОиР (фрагмент).

На Рис. 7 приведен укрупненный алгоритм корректировки первоначального плана обслуживания для ситуации, когда сформированный первичный план нарушает критерий своевременного обслуживания по deadline.

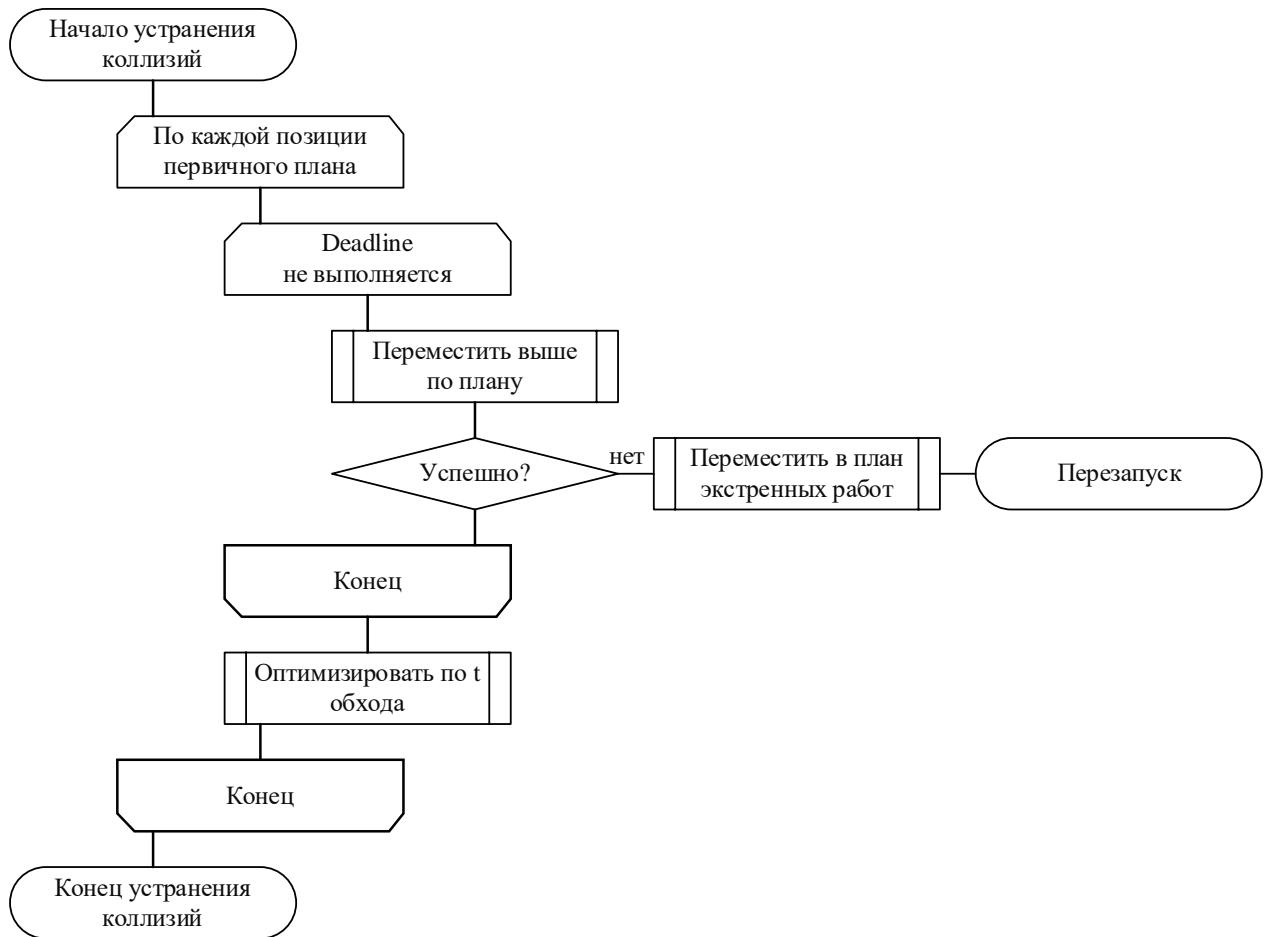


Рисунок 7. Укрупненный алгоритм устранения deadline-коллизий.

Программная реализация

Для исключения затрат времени на поиск места установки оборудования система формирует маршрут перемещения инженера на плане здания (Рис. 8).

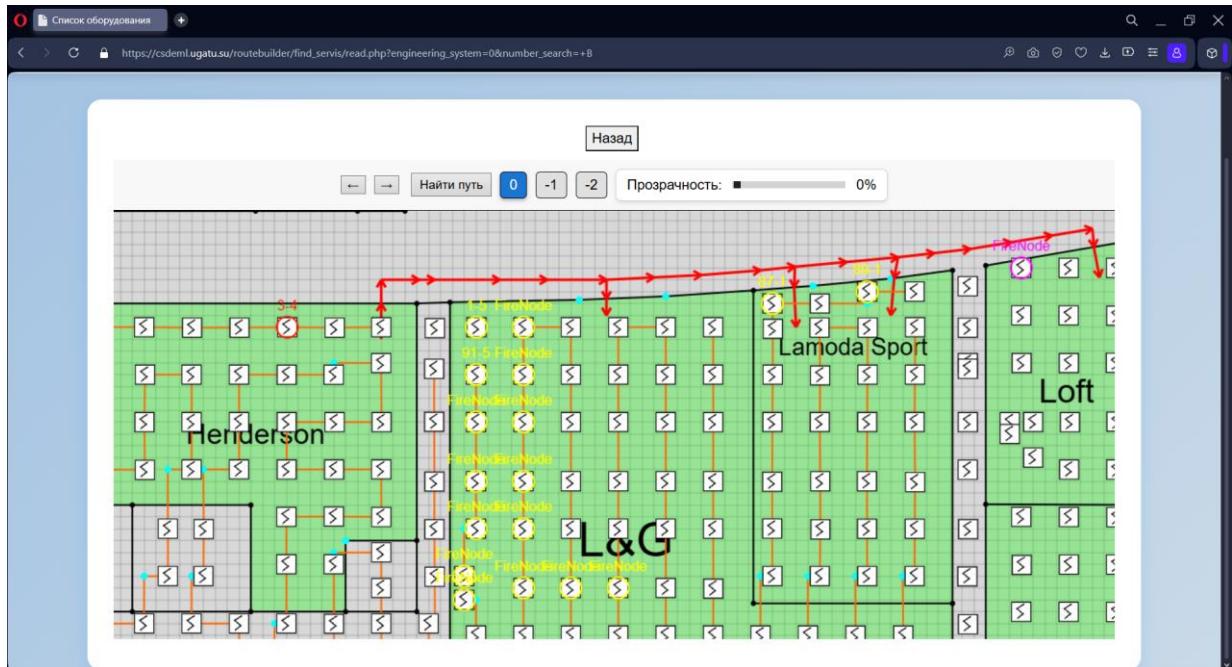


Рисунок 8. Визуализация маршрута перемещений инженера при выполнении ТОиР.

Проводя работы по сформированному суточному плану, инженер фиксирует результат обслуживания каждого элемента системы (Рис. 9), информация об этом обновляется в базе данных в режиме реального времени [12]. Для оборудования начинается новый отсчет времени до следующего обслуживания. При невозможности восстановления работоспособности инженер описывает причину неисправности, перечень необходимых материалов, запасных частей и инструмента, необходимого для решения проблемы. Данная информация фиксируется в базе данных, оборудование переносится в перечень внеплановых работ.

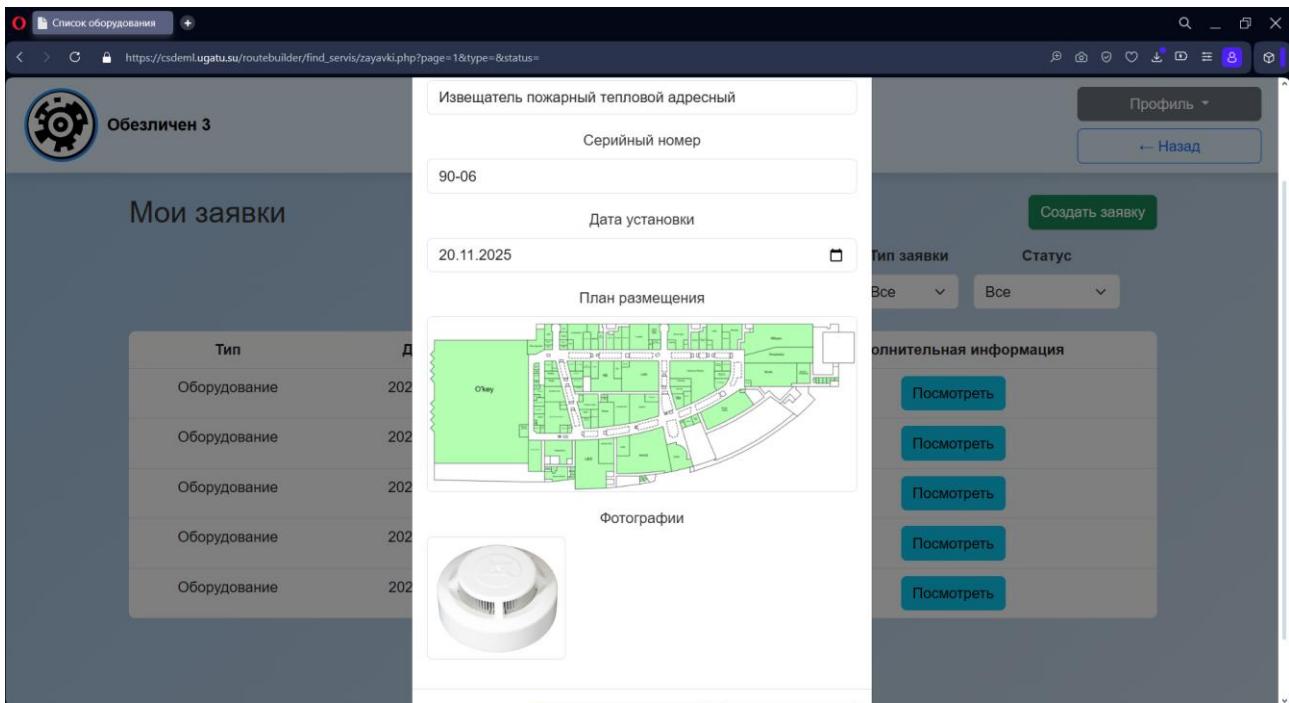


Рисунок 9. Суточный план работ.

Работы, не завершенные в рамках суточного плана и не отмеченные инженером до конца рабочего дня, согласно алгоритму, планируются при формировании новых суточных заданий. При этом невыполненные работы не всегда попадают в начало плана работ следующего рабочего дня, все будет определяться множеством факторов, таких как поступление заявок на внеплановое обслуживание, поступление на склад расходных материалов, запасных частей и оборудования для работ, deadline которых наступает раньше, а также на основе решения модифицированной задачи коммивояжера, положенной в основу построения оптимального маршрута при выполнении работ по ТОиР.

Проверка работоспособности моделей и алгоритмов

Корректность функционирования алгоритмов проверена на задаче отображения результата поиска местоположения оборудования на плане здания и составления суточного плана работ по ТОиР для системы, насчитывающей в своем составе свыше 10 000 пожарных извещателей. Результатом работы системы являлись план-график выполнения работ по ТОиР, построение маршрута от помещения инженерной службы до местоположения конкретного датчика и построение оптимального маршрута при выполнении суточного плана по ТОиР.

В качестве физического сервера был использован персональный компьютер с четырехядерным процессором Intel Core i7 с тактовой частотой 3 Гц, оперативной памятью 16 ГБ и SSD накопителем 1 ТБ. В качестве операционной системы на сервере была установлена ОС Windows 2016 Server. Также на сервере были установлены web-сервер Apache 2.4, интерпретатор PHP версии 8.4, СУБД MariaDB 10.3.

В качестве клиентской части приложения применялись ноутбук с процессором Intel Core i5 с тактовой частотой 2,8 МГц, оперативной памятью 8 ГБ и накопителем SSD емкостью 512 ГБ, Планшетный ПК Apple iPad Pro 2-го поколения и смартфоны iPhone 7, iPhone 13.

Во всех случаях разработанное программное обеспечение показало высокую отзывчивость при тестировании. Время решения задачи составляло менее 1 с, а отображение на экране маршрутов доступа не превышало 5 секунд. Такой результат достигнут благодаря правильному распределению нагрузки между клиентом и сервером. На сервере выполняются все необходимые вычисления, результат которых передается в клиентскую часть, на которой задействуются мощности клиентского оборудования для визуализации полученного результата. При этом сам сервер и канал связи нагружаются незначительно, поскольку такое решение не требует передачи растровых изображений высокого качества – изображение растирается на стороне клиента, в то время как любые современные смартфоны с легкостью выполняют клиентскую часть задачи.

Заключение

В работе предложен новый подход к автоматизации планирования технического обслуживания и ремонта комплекса инженерных систем зданий архитектурно- и инфраструктурно-сложных объектов, основанный на использовании цифровой модели объекта, нормативно-справочной документации оборудования, данных о дате введения его в эксплуатацию, сроках проведения периодического технического обслуживания, ремонтах, наработке до предельного состояния и времени до следующего планового обслуживания.

Разработанные модели и алгоритмы, реализованные в виде информационной системы, построенной по трехзвенной архитектуре «клиент-сервер-сервер базы данных», обеспечивают обработку указанных данных об оборудовании, а также сведений о его фактическом местоположении на объектах для планирования и эффективного использования ресурсов при выполнении работ по ТОиР, а также оперативному определению местоположения источника сигналов о нештатных ситуациях.

Система позволяет учитывать изменения внутренней структуры здания, текущее состояние оборудования, ограничение прав доступа к помещениям, расписание доступа для различных категорий посетителей и персонала, что обеспечивает корректное планирование работ по ТОиР и исключает простоя инженерно-технического персонала, оптимизирует планы, минимизируя маршруты перемещений между помещениями в процессе выполнения работ по ТОиР для снижения непроизводительных временных затрат.

Система позволяет находить пути минимального времени доступа для решения задач идентификации нештатных ситуаций с целью быстрого обнаружения источника сигнала НС и принятия решения о полной или частичной эвакуации посетителей и персонала в архитектурно- и инфраструктурно-сложных объектах.

Система построена с применением свободного ПО и является открытой для разработки новых модулей, в частности внедрения технологий искусственного интеллекта, основанного на правилах, для повышения скорости ввода информации о составе и расположения элементов инженерных систем на новых объектах.

Система может быть интегрирована непосредственно с инженерными системами, в частности системами контроля и управления доступом, для взаимодействия с ними в реальном времени с целью повышения оперативности принятия решений в задачах обеспечения безопасного и комфортного нахождения посетителей и персонала на рассматриваемых объектах. При этом вмешательства в работу систем жизнеобеспечения на физическом и программном уровне не требуется. Достаточно добавления в существующие системы дополнительных модулей, дублирующих сигналы основной системы в разрабатываемую.

Применение разработанной информационной системы повышает управляемость эксплуатационных процессов, улучшает качество планирования ТОиР и способствует более эффективному использованию ресурсов обслуживающего персонала. Перспективой дальнейшего развития является интеграция с системами мониторинга инженерных систем реального времени и внедрение алгоритмов анализа статистики отказов.

Литература:

1. Puttinaovarat S., Jutapruet S. Facility maintenance management system based on GIS and indoor map // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2019. No. 4. P. 3323–3332.
2. От детей остались лишь косточки: поминутная хроника «Зимней вишни» – трагедии, которую оплакивал весь мир. НГС.КЕМЕРОВО. [Электронный ресурс] URL: <https://ngs42.ru/text/incidents/2025/03/25/75242276/> (дата обращения: 20.11.2025). [Only bones remain of the children: a minute-by-minute chronicle of the “Winter Cherry” tragedy mourned by the entire world. NGS.KE-MEROVO. [Webpage] URL: <https://ngs42.ru/text/incidents/2025/03/25/75242276/> (access date: 20.11.2025) (in Russian)].
3. Соловьев И.В. Общие принципы управления сложной организационно-технической системой // Перспективы Науки и Образования. 2014. № 2(8). С. 21–27. [Solov'ev I.V. general principles of management of complex organizational and technical system // Perspectives of Science and Education. 2014. No. 2(8). P. 21–27 (in Russian)].
4. Булычев С.Н., Столбов А.В., Мокиевский А.А. Методика определения структуры сложной организационно-технической системы // Вестник Российской нового университета. Серия «Сложные системы...». 2020. № 3. С. 74–83. [Bulychev S.N., Stolbov A.V., Mokievskij A.A. Methodology for structure determination of the complex organisational and technical system // Vestnik of Russian New University. Series “Complex Systems...”. 2020. No. 3. С. 74–83 (in Russian)].
5. Гура Д.А., Дубенко Ю.В., Бучацкий П.Ю., Марковский И.Г., Хушт Н.И. Мониторинг сложных объектов инфраструктуры // Вестник Адыгейского государственного университета. 2019. № 4(251). С. 74–80. [Gura D.A., Dubenko Yu.V., Buchatsky P.Yu., Markovsky I.G., Khush N.I. Monitoring of complex infrastructure facilities // Vestnik Adygeyskogo Gosudarstvennogo Universiteta. 2019. No. 4(251). P. 74–80 (in Russian)].
6. ГОСТ 31817.1.1-2012. Системы тревожной сигнализации. М.: Стандартинформ, 2019. 19 с. [GOST 31817.1.1-2012. Alarm systems. Moscow: Standartinform, 2019. 19 p. (in Russian)].
7. Сиксимов Д.А., Мереняшев В.Е. Опыт применения ГОСТ Р 59638-2021 для анализа статистики ложных срабатываний системы пожарной сигнализации на примере многофункционального торгово-развлекательного комплекса // Безопасность техногенных и природных систем, 2022. № 4. С. 30–41. [Siksimov D.A., Merenjashev V.E. Experience of application of GOST R 59638-2021 for the analysis of statistics of false alarms of the fire alarm system on the example of a multifunctional shopping and entertainment complex // Safety of Technogenic and Natural Systems. 2022. No. 4. P. 30–41 (in Russian)].
8. El-Gamly H., Al-Rasheed K. Deploying an Interactive GIS System for Facility and Asset Management: Case Study – Ministry of Education, Kuwait // Journal of Geographic Information System, 2015. No. 7. P. 191–201.
9. Сергеева А.Е., Кальметьев Э.И. Обзор существующих решений в области технического обслуживания и ремонта инженерных систем // Международный студенческий научный вестник. 2025. № 3. [Электронный ресурс] URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=21870> (дата обращения 20.11.2025). [Sergreeva A.E., Kalmetev E.I. Review of existing solutions in the field of maintenance and repair of engineering systems // Mezhdunarodnyy Studencheskyy Nauchnyy Vestnik. 2025. No. 3. [Webpage] URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=21870> (access date 20.11.2025) (in Russian)].
10. Сергеева А. Е., Кальметьев Э. И., Минасов Ш. М. Модели и алгоритмы формирования оптимального маршрута при техническом обслуживании и ремонте инженерных систем на объектах сложной геометрии. В сб.: Мавлютовские чтения: Материалы XVIII Всероссийской молодежной научной конференции, Уфа, 25–29 ноября 2024 года. В 9-ти томах. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. С. 843–849. [Sergeeva A. E., Kalmetev E. I., Minasov Sh. M. Models and algorithms for forming an optimal route during maintenance and repair of engineering systems at facilities with complex geometry // Mavlyutov Readings: Proceedings of the 18th All-Russian Youth Scientific Conference, Ufa, November 25–29, 2024. In 9 volumes. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2024. P. 843–849 (in Russian)] EDN JZGHXW.

11. Han J., Zhou X., Zhang W., Guo Q., Wang J., Lu Y. Directed representative graph modeling of MEP systems using BIM data // Buildings. 2022. No. 12(6). P. 1–21.
12. Минасов Ш. М. Обработка информации в системах реального времени: учебное пособие для студентов высших учебных заведений РФ, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 230300 “Организационно-технические системы” и специальности 230301 “Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах” Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2008. 258 с. [Minasov Sh. M. Information processing in real-time systems: textbook for students of higher educational institutions of the Russian Federation studying in the direction of training certified specialists 230300 “Organizational and Technical Systems” and specialty 230301 “Modeling and Research of Operations in Organizational and Technical Systems”. Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2008. 258 p.]. ISBN 978-5-86911-886-8. EDN QMTRCD.

Об авторах:

КАЛЬМЕТЬЕВ Эмиль Ильгизович, аспирант кафедры информатики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, kalmetev.emil@yandex.ru.

СЕРГЕЕВА Анастасия Евгеньевна, диспетчер контроля выполнения технологического графика обслуживания воздушных судов АО Группы контроля и исполнения суточного плана полетов Производственно-диспетчерской службы Международный аэропорт «УФА», Булгаково, Россия, nasty.a.levina.0220@mail.ru.

МИНАСОВ Шамиль Маратович, канд. тех. наук по математическому и программному обеспечению вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, доц. каф. информатики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, minasov@ufanet.ru.

МУХАМАДЕЕВ Тимур Венерович, студент, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, timamv030507@gmail.com

Metadata:

Title: Information system for planning maintenance and repair of engineering systems.

Author 1: Emil Ilgizovich Kalmetev, Postgraduate student, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, kalmetev.emil@yandex.ru.

Author 2: Anastasia Evgenievna Sergeeva, dispatcher for monitoring the implementation of the technological schedule for servicing aircraft of Group for Monitoring and Implementing the Daily Flight Plan of the Production and Dispatch Service of International Airport “UFA”, 131 Airport microdistrict, 450056 Bulgakovo, Republic of Bashkortostan, Russia, nasty.a.levina.0220@mail.ru.

Author 3: Shamil Maratovich Minasov, Cand. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Science, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, minasov@ufanet.ru.

Author 4: Timur Venerovich Mukhamadeev, student of the Department of Mechanical Engineering Technology, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, timamv030507@gmail.com

Abstract: Proper planning of maintenance and repair of life support systems in buildings and structures where people gather is essential for preserving their lives and health in the event of emergencies. This paper proposes a solution to the problem of planning maintenance and repair work for engineering systems in architecturally and infrastructurally complex buildings. It analyzes existing approaches and software solutions and identifies their limitations and drawbacks. The paper presents the developed functional and information models of the maintenance and repair planning process, the algorithms for creating effective maintenance plans, the architecture of the developed information system that provides automated creation of maintenance plans taking into account spatial and temporal constraints, the construction of maintenance routes on building plans, and the screen forms of the implemented system for planning, executing, and monitoring the performed work during maintenance and repair.

Keywords: maintenance and repair; engineering systems; building life support systems; work planning; in-building navigation; visual display of movement in multi-level spaces.