

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ И РЕМОНТУ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ НА ОБЪЕКТАХ СЛОЖНОЙ ВНУТРЕННЕЙ ТОПОЛОГИИ

А. Е. СЕРГЕЕВА¹, Э. И. КАЛЬМЕТЬЕВ², Ш. М. МИНАСОВ³

¹ nastya.levina.0220@mail.ru, ² kalmetev.emil@yandex.ru@yandex.ru, ³ minasov@ufanet.ru

¹⁻³ ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. Описаны проблемы технического обслуживания и ремонта инженерных систем многоэтажных зданий большой протяженности, внутренняя топология которых периодически меняется. Предложена модель описания топологии зданий и инженерных систем, обеспечивающая возможность внесения изменений в описание системы без перестроения моделей. Разработана математическая модель поиска оптимального решения при планировании технического обслуживания и ремонта инженерных систем. Разработан алгоритм, и реализован прототип системы поддержки принятия решений планирования работ по ТОиР.

Ключевые слова: инженерно-технические системы; внутриобъектовая навигация; нештатные ситуации; комплексная безопасность; системы пожарной сигнализации; надежность и безопасность организационно-технических систем; системы поддержки принятия решений.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является система управления инженерными сетями в зданиях с динамической топологией, таких как торгово-развлекательные центры, учебные заведения и многоуровневые офисные комплексы [1]. К таким объектам предъявляются высокие требования по надежности и безопасности функционирования в процессе эксплуатации, и характерны такие моменты, как наличие гибкой инфраструктуры в связи с изменением пользователей помещений, требований к определенным категориям деятельности, объединением нескольких помещений в одно или разделением помещений на отдельные зоны, что влечет необходимость оперативного внесения изменений в соответствующие системы и схемы их функционирования, например в системы электроснабжения, водоснабжения, вентиляции, пожарной безопасности, видеонаблюдения и другие [2]. Поскольку в процессе эксплуатации такие здания претерпевают вышеуказанные изменения, это создает определенные сложности в локализации неисправностей из-за изменения маршрутов перемещений внутри объекта, для доступа к элементам таких систем при проверке причин срабатывания.

Предметом исследования является разработка моделей организации хранения данных и алгоритмов маршрутизации, направленных на эффективное решение таких задач, как восстановление работоспособности систем в случаях отказов отдельных элементов, поиск источника данных об отказе, локализация его фактического местоположения и расчет маршрута минимальной длительности для физического доступа в источник с целью подтверждения факта верного либо ложного срабатывания систем комплексной безопасности объекта. Развитие тех-

нологий «умных зданий» позволяет упростить задачу локализации места регистрации нештатной ситуации и верификации достоверности данных интеллектуальных систем мониторинга и диагностики.

Современные технологии автоматизации и цифровизации значительно повышают эффективность управления инженерными системами. Однако с ростом их сложности возникает потребность в новых методах анализа и контроля. Под зданиями с динамической топологией понимаются объекты, в которых назначения помещений и маршруты перемещения могут меняться в зависимости от ситуации. Например, при срабатывании пожарной сигнализации отключаются лифты, что меняет доступность путей внутри здания. Пространства могут изменять категории и адаптироваться под разные нужды, влияя на маршруты как в штатных, так и нештатных режимах. При этом оборудование может оставаться на месте, но оказаться в помещении с иным уровнем доступа [3].

Системы пожарной безопасности (оповещения и пожаротушения) – одни из важнейших для работы зданий. Сбои в датчиках дыма, спринклерах или аварийных выходах могут угрожать жизни людей и вызывать значительные потери. Ошибки в определении мест повреждений ведут к задержкам, а ложные сработки – к ненужной эвакуации. Например, отсутствие точных данных о расположении поврежденных элементов приводит к дополнительным временным затратам на их поиск, а ложные срабатывания могут вызвать ненужную активацию эвакуации.

В соответствии с исследованием, приведенным в работе Д. А. Сиксимова, В. Е. Мереняшева «Опыт применения ГОСТ Р 59638-2021 для анализа статистики ложных срабатываний системы пожарной сигнализации на примере многофункционального торгово-развлекательного комплекса» [4], данные таблицы статистики ложных срабатываний за 2019–2021 годы подтверждают, что основная причина «предтревог» – это нежелательные срабатывания, связанные с воздействием различных факторов, таких как вытяжки при приготовлении пищи, выбросы масла и дыма, а также строительные и монтажные работы. Это подчеркивает необходимость постоянной оптимизации процессов технического обслуживания и быстрого реагирования на неисправности, чтобы минимизировать риск ложных тревог.

Среди множества причин ложных срабатываний особое внимание следует уделить человеческому фактору. Ошибки персонала составляют около 4 % всех инцидентов, а повреждения изоляции – 3 %. Влияние внешних помех также значительно, например, посторонние предметы и сквозняки могут вызвать ложные срабатывания (по 4 % каждый), электромагнитные наводки – менее 1 %, а превышение температурного порога – 2 %. Дополнительным риском являются проблемы с заземлением и короткие замыкания на земляной шине – 1 %, а также оседание и движение пыли, что составляет 12 % случаев. Не менее важным является неблагоприятное воздействие внешней среды. Например, некачественные контакты электрических соединений и релейных выходов приводят к ложным срабатываниям в 5 % случаев, а воздействие повышенной влажности – в 22 %. Отказы технических средств, такие как неисправности пожарных извещателей (37 %), приемно-контрольных приборов (5 %) и блоков питания (1 %), также являются весомыми факторами в статистике ложных срабатываний [5].

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящей работы является повышение эффективности работы системы комплексной безопасности зданий и сооружений при планировании технического обслуживания и ремонта, а также оперативного анализа причин возникновения нештатных ситуаций для исключения в случае ложных срабатываний активации сценариев парирования нештатных ситуаций.

Предлагаемое решение ориентировано на существенное уменьшение временных затрат, необходимых для идентификации причин и локализации источников нештатных ситуаций в системах безопасности. Важной частью подхода является использование алгоритмов маршрутизации для эффективной навигации внутри сложных зданий, что обеспечивает оперативный доступ к информации относительно возникающих событий и способствует принятию быстрых решений по устранению любых внеплановых ситуаций [6].

Предположение о повышении качества принимаемых решений обосновывается снижением времени на обнаружение источника сигнала о нештатной ситуации, соответственно увеличением времени на оценку ситуации и принятие решения о применении сценариев парирования нештатных ситуаций. Так, по результатам оценки МВД РФ, более 47 % сработки систем пожарной сигнализации в 2021 г. являлись ложными, и только 27 % случаев требовали привлечения соответствующих структур для ликвидации реальных возгораний [7].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На рис. 1 изображен фрагмент информационной модели, который описывает данные для поиска оборудования и навигации внутри здания. Эта модель позволяет учитывать пути к оборудованию с учётом прав доступа, расписания работы и в экстренных ситуациях. В ней прописаны зоны доступа, такие как коридоры, помещения и лифты, которые можно дополнить в зависимости от особенностей системы. Модель хранит информацию о размещении оборудования, связях между элементами, режимах работы, правах доступа, истории обслуживания и ремонтных работах, а также данные о сотрудниках, выполняющих эти работы [8].

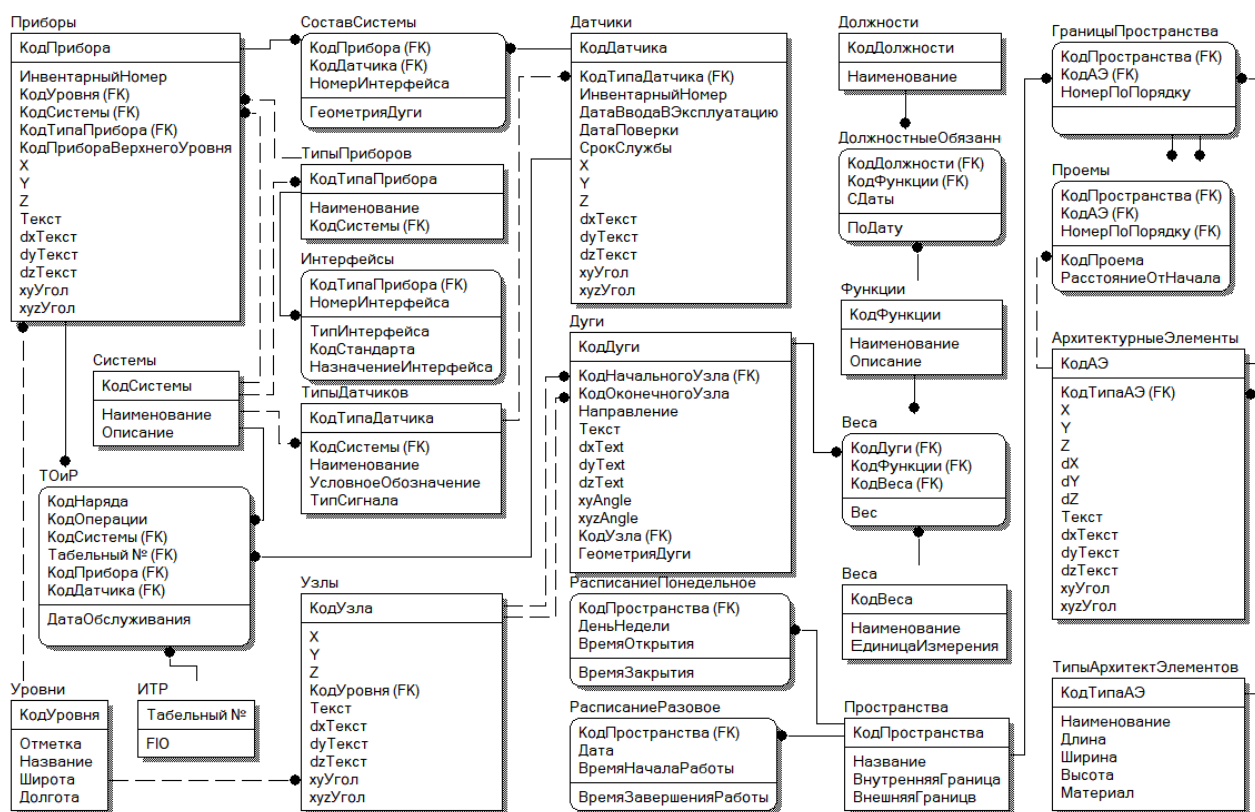


Рис. 1. Информационная модель данных системы (фрагмент)

Для построения модели инженерных систем используется ориентированный граф $G=(D,E)$, где узлы (вершины) $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ соответствуют элементам инфраструктуры: датчики, насосы, трубопроводы и пр.; рёбра $E \subseteq D$ отображают связи между ними – например, кабельные соединения, трубопроводы.

Местоположение каждого элемента оборудования на плоскости задается с использованием координат:

$$d_i = (x_i, y_i).$$

Все элементы оборудования составляют множество D :

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$$

Для поиска оптимального маршрута от местоположения инженера до неисправного оборудования необходимо вычислить кратчайший путь в графе. Это можно сделать с помощью алгоритма Дейкстры, который эффективно решает задачу поиска кратчайших путей в графах с положительными весами ребер. Расстояние между элементами оборудования вычисляется по стандартной формуле Евклида:

$$\omega_{ij} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Местоположение инженера определяется как:

$$P = (x_p, y_p)$$

Оптимальный маршрут $Path$ от текущего местоположения инженера P до неисправного оборудования D_f по алгоритму Дейкстры, минимизируя общий вес маршрута:

$$Path = \min \sum_{e_{ij} \in Path}^n \omega_{ij}$$

В случае, если имеются несколько неисправных элементов системы $\{d_{f1}, d_{f2}, \dots, d_{fm}\}$, задача превращается в задачу коммивояжера. Задача заключается в том, чтобы найти такой маршрут, который минимизирует суммарное расстояние для посещения всех неисправных узлов. Алгоритм маршрутизации учитывает актуальное расположение датчиков и рассчитывает оптимальный путь в реальном времени, снижая время обслуживания и повышая эффективность регламентных мероприятий. Оценка объема работ, выполняемых за смену одним инженером, определяется на основе планируемости задач [9].

Для повышения эффективности обслуживания инженерных систем графовая модель дополняется формализованной системой распределения задач между инженерами. Это позволяет учитывать, как топологию связей, так и реальные ограничения – теги специалистов, их доступность и местоположение.

Инженер $i \in I$ может быть назначен на обслуживание оборудования $d \in D$, только если выполняются все следующие условия: у инженера и помещения, в котором находится оборудование, должен быть хотя бы один общий тег, то есть $Tag(i) \cap Tag(Room(d)) \neq \emptyset$, что означает доступность к данной локации; сам инженер должен обладать временем для выполнения работ, то есть иметь статус «свободен» – $status(i) = free$; оборудование требует обслуживания, что определяется по сроку последней проверки, либо оно неисправно ($R_e = 0$).

$$canOperate(i, d) \Leftrightarrow [Tag(i) \cap Tag(Room(d)) \neq \emptyset] \wedge [stat(i) = free] \wedge \wedge [Re = 0] \wedge [LastCheck(d) + Interval(d) < Today]$$

Кроме того, каждое оборудование может быть назначено только одному инженеру:

$$\forall d \in D: |\{i \in I\}| \leq 1$$

На основе заранее сформированного месячного плана $P_m \subseteq D$, куда попадает все оборудование, требующее обслуживания $d \in P_m$ и которому соответствует плановая дата $Date(d)$, ежедневно формируются суточные планы:

$$P_d(i) = \{d \in P_m \mid Date(d) = Today \wedge canOperate(i, d)\}$$

Если в течение дня возникает аварийная ситуация $A \subseteq D$, инженер переназначается, а необслуженные задачи возвращаются в месячный план:

$$P_d^{незав.}(i) = \{d \in P_d(i) \mid \text{не обслужено}\}$$

$$P_m \leftarrow P_m \cup P_d^{незав.}(i)$$

Такая модель позволяет динамически адаптировать маршруты, приоритизировать аварии и гарантировать, что ни одна задача не будет потеряна. Это повышает надёжность системы, снижает издержки и обеспечивает гибкое реагирование в условиях живой инфраструктуры.

АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА

Алгоритм планирования оптимального маршрута включает сбор данных о текущем состоянии здания, создание графовой модели инфраструктуры, выбор метода маршрутизации (Дейкстра для одной неисправности, задача коммивояжера для множества), а также учет трех типов изменений в топологии: редких, периодических и неотложных (рис. 2).

Изменения маршрутов бывают редкими, периодическими и неотложными. Редкие связаны с перепланировкой помещений, например, при смене арендаторов в торговом центре – тогда система заранее обновляет карту и маршруты. Периодические изменения возникают во время мероприятий (выставки, конференции), когда временные конструкции влияют на проходимость – в этих случаях маршруты адаптируются по заранее известному расписанию [10]. Неотложные изменения происходят при аварийных ситуациях, таких как отключение лифтов, закрытие выходов или срабатывание пожарных систем – система немедленно пересчитывает маршруты и отображает обновлённую информацию на интерактивной карте [11].

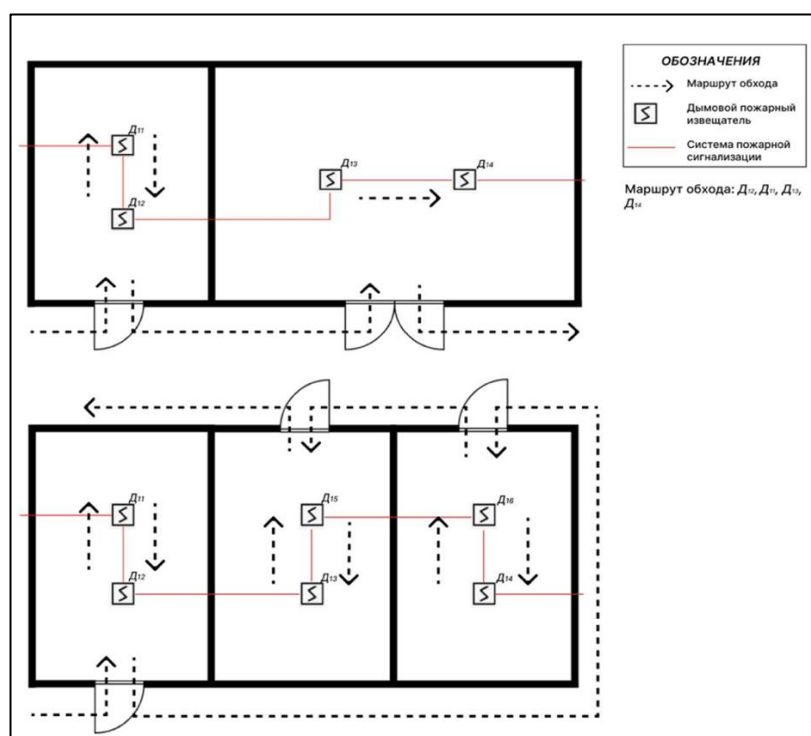


Рис. 2. Пример изменения размещения инженерной системы

На рис. 3 показана блок-схема алгоритма планирования технического обслуживания и ремонта (ТОиР) для технических объектов из нескольких инженерных систем. Сначала определяются перечень оборудования и сроки выполнения работ. Затем проверяется наличие запасных частей (ЗИП), и задачи ранжируются по срочности. Компоненты группируются по локациям и системам для построения логичной структуры работ. На основе этого формируется план обслуживания с учётом топологии оборудования. Далее оптимизируются маршруты для параллельного или минимально перемещаемого мультисистемного обслуживания. В конце оценивается общее время работ и оформляется заказ на недостающие ЗИП с расчётом трудоёмкости. Такой подход повышает эффективность, снижает простои и оптимизирует затраты.

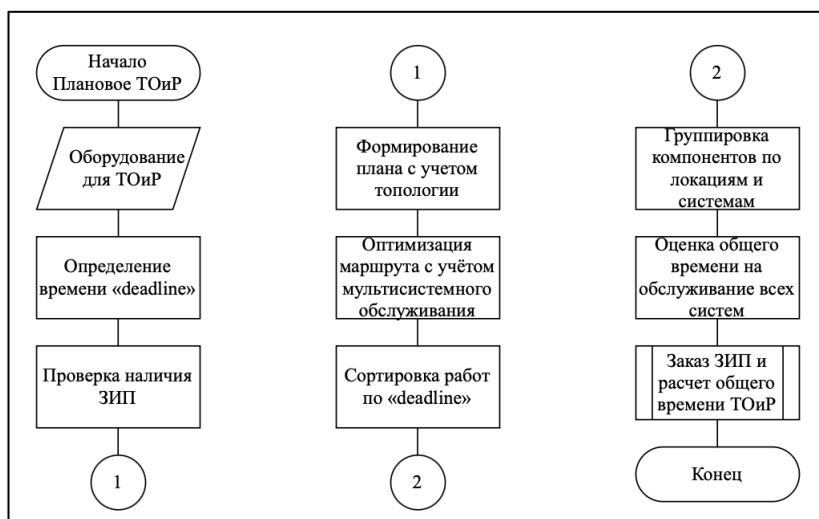


Рис. 3. Блок-схема алгоритма планирования

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для эффективного контроля и оперативного реагирования на неисправности разрабатывается веб-платформа, позволяющая пользователям (инженерам, техникам) выполнять техническое обслуживание для выявления неисправностей оборудования и предотвращения нештатных ситуаций. Они могут фиксировать неисправности, отображать местоположение неисправного оборудования на интерактивной карте и рассчитывать кратчайший маршрут для устранения проблемы [12].

На рис. 4 представлен справочник оборудования с фильтрами, которые помогают найти характеристики, местоположение и маршрут к интересующему оборудованию, что упрощает процесс поиска и ускоряет обслуживание.

Инженерная система	Тип оборудования	Номер	Изображение	Схема подключения	Срок службы	Дата установки	Высота (м)	Уровень	Помещение
Система ПБ	Извещатель пожарный автоматический дымовой	95-3	Нет фото	—	—	2025-05-29	1	-2	3
Система ПБ	Извещатель пожарный автоматический дымовой	94-3	Нет фото	—	—	2025-05-29	1	-2	
Система ПБ	Извещатель пожарный автоматический дымовой	93-3	Нет фото	—	—	2025-05-29	1	-2	

Рис. 4. Справочник данных технического оборудования

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ

Проведен эксперимент, в ходе которого инженер должен был провести обход 10 помещений торгового центра и замену 2 пожарных рукавов. Перемотка рукавов осуществляется примерно один раз в 3 месяца, что влияет на общую продолжительность обслуживания. Это время не включается в основной маршрут обхода, но оно все равно требует ресурсов, и на него стоит ориентироваться при планировании рабочего процесса.

Изначально длина маршрута обхода всех систем (пожаротушение и пожарная безопасность) составила 840 метров, при этом маршрут обслуживания двух пожарных рукавов составлял дополнительные 250 метров. После применения алгоритма оптимизации маршрута, который объединил обход систем и обслуживание пожарных рукавов, длина маршрута составила 890 метров. Таким образом, работы по замене пожарных рукавов в «попутном режиме» увеличили маршрут всего на 50 метров (получение рукавов на складе + отклонение от основного маршрута) вместо 250, предусмотренных изначально. Экономия времени на перемещение между локациями составила время на 18 % от первоначального плана, или не увеличилась на 22 % из-за неэффективного планирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен метод описания топологии инженерно-технических систем, адаптированных к динамическим изменениям внутреннего пространства зданий. Разработаны математические модели оптимизации маршрутов для технического обслуживания и устранения неисправностей, позволяющие повысить эффективность поддержания в исправном состоянии инженерных систем при эксплуатации.

Математическая модель поиска оптимального маршрута основана на модифицированном алгоритме Дейкстры и решении задачи коммивояжера. Такой подход не только точно выявляет источники неисправностей, но и ускоряет их устранение, минимизируя время доступа инженерно-технического персонала к элементам системы комплексной безопасности. Алгоритм планирования ТОиР систем комплексной безопасности обеспечивает их стабильную работу, а актуализация данных при изменении конфигурации объекта позволяет быстро локализовать источник отказа и принять оптимальные меры для предотвращения сбоев и ложных срабатываний в будущем [13].

Оптимизация маршрута обхода систем пожаротушения и безопасности позволила значительно сократить время работы, улучшив общую эффективность на 30 %. Важным фактором для повышения производительности является правильное распределение ресурсов и учет времени на дополнительные операции, которые не входят в основной маршрут, но все равно требуют внимания и влияют на общий рабочий процесс. Соблюдение нормативных требований безопасности и правильная организация рабочих процессов остаются ключевыми для достижения наилучших результатов.

Предложенное веб-приложение отображает структуру системы, показывает неисправности на интерактивной карте и рассчитывает кратчайшие пути для их обнаружения. Тестирование системы показало, что время обнаружения источника проблемы сокращается более чем в два раза по сравнению с системой оповещения о пожаре. Технология может быть использована не только для безопасности, но и в коммерции, например, для поиска товаров в магазинах с актуализированной базой данных, что сокращает время покупок и повышает привлекательность торговых комплексов [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 // Мавлютовские чтения: Матлы XVIII Всероссийской молодежной научной конференции. Уфа, 2024. С. 843–849.
2. Жуковский О. И., Гриценко Ю. Б. Типология инженерных сетей и классификация задач их эксплуатации // Доклады ТУСУР. 2011. №2-2 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tipologiya-inzhenernyh-setey-i-klassifikatsiya-zadach-ih-ekspluatatsii> (дата обращения: 30.05.2025)..
3. Мохов А. И. Использование инфографических моделей для описания функционального подхода в управлении внутренней средой интеллектуальных зданий / А. И. Мохов, Р. В. Душкин, В. А. Лелекова // Российский новый университет. Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление: научный журнал. 2021. № 4. Ч. 1. С. 87–97.
4. 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. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-gost-r-59638-2021-dlya-analiza-statistiki-lozhnyh-srabyatyvaniy-sistemy-pozharnoy-signalizatsii-na-primere> (дата обращения: 30.05.2025).

5. Ложная тревога. Источник: <https://propb.ru/library/wiki/lozhnaya-trevoga/> © Портал про пожарную безопасность propb.ru / [Электронный ресурс] // Портал про пожарную безопасность: [сайт]. URL: <https://propb.ru/library/wiki/lozhnaya-trevoga/> (дата обращения: 30.05.2025).
6. Интеллект. Безопасность. Ложные пожарные тревоги в развлекательных, торговых и гостиничных помещениях. URL: <https://in-bez.ru/new/lozhnye-pozharnye-trevogi-v-razvlekatelnykh-torgovykh-i-gostinichnykh-pomeshcheniyakh/> (дата обращения: 30.05.2025).
7. Sariman M. S. et al. Algorithm-Based Indoor Navigation System for Multi-Story Building. IEEE 13th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Kitakyushu, Japan, 2024. 371–374. DOI: 10.1109/GCCE62371.2024.10760553.
8. Павлов С. В. Методы представления двухмерной пространственной информации в трехмерном пространстве при создании трехмерной модели промышленного объекта / С. В. Павлов, А. В. Соколова, О. И. Христуло // Геоинформационные технологии в проектировании и создании корпоративных информационных систем. Уфа: ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», 2015. С. 16–22. EDN VYEZLJ.
9. Минасов Ш. М. Обработка информации в системах реального времени: Учебное пособие. Уфа: Уфимский гос. авиационный технический ун-т, 2008. 258 с. ISBN 978-5-86911-886-8. EDN QMTRCD.
10. Информационная поддержка управления уязвимостью сложных распределенных систем на основе обработки пространственной информации / Е. С. Брекоткина, М. Б. Гузаиров, С. В. Павлов [и др.] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 2(29). DOI 10.26102/2310-6018/2020.29.2.023. EDN DZUNVQ.
11. Иванов В. А., Фещенко А. А. Особенности подходов к техническому обслуживанию и ремонту оборудования в непрерывном производстве // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2018. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-podhodov-k-tehnicheskomu-obslužhivaniyu-i-remontu-oborudovaniya-v-nepreryvnom-proizvodstve> (дата обращения: 30.05.2025).
12. Puttinaovarut S., Jutapruet S., et al. Facility maintenance management system based on GIS and indoor map // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2019. Vol. 9. No. 4 С. 3323–3332.
13. Мустаев Л. М., Минасов Ш. М. Модели и алгоритмы ориентации в закрытых пространствах в условиях неустойчивого сигнала систем глобального позиционирования // Невский форум молодежных исследований. СПб., 2024. С. 51–57.
14. El-Gamily 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. 7. 191–201.

ОБ АВТОРАХ

СЕРГЕЕВА Анастасия Евгеньевна, студ. каф. информатики УУНиТ.

КАЛЬМЕТЬЕВ Эмиль Ильгизович, студ. каф. информатики УУНиТ.

МИНАСОВ Шамиль Маратович, доцент, к. техн. наук., доцент кафедры информатики УУНиТ.

METADATA

Title: Models and algorithms for planning maintenance and repair of equipment of geographically distributed engineering systems at facilities with complex internal topology

Author: A.E. Sergeeva¹, E.I. Kalmetyev², Sh.M. Minasov³

Affiliation:

^{1,2,3} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ nastya.levina.0220@mail.ru, ² kalmetev.emil@yandex.ru@yandex.ru, ³ minasov@ufanet.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology) no. 3 (34), pp. 54-61, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The problems of maintenance and repair of engineering systems of multi-storey buildings of long length, the internal topology of which changes periodically, are described. A model for describing the topology of buildings and engineering systems is proposed, which provides the possibility of making changes in the system description without rebuilding the models. A mathematical model of searching for an optimal solution when planning maintenance and repair of engineering systems is developed. An algorithm is developed and a prototype of the decision support system for planning of maintenance and repair works is realized.

Key words: Engineering systems, in-situ navigation, abnormal situations, integrated security, fire alarm systems, reliability and safety of organizational and technical systems, decision support systems.

About authors:

SERGEEVA Anastasiya Evgenyevna, student, Dept. of Informatics (UUST).

KALMETEV Emil Ilgizovich, student, Dept. of Informatics (UUST).

MINASOV Shamil Maratovich, associate professor, candidate of technical sciences, associate professor of the Dept. of Informatics.