

УДК 004.021

doi 10.54708/22259309_2025_33441

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ И РЕМОНТЕ ОБОРУДОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТОПОЛОГИИ ВНУТРЕННЕГО ПРОСТРАНСТВА ЗДАНИЙ

Э. И. КАЛЬМЕТЬЕВ¹, А. Е. СЕРГЕЕВА², Ш. М. МИНАСОВ³

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

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНиТ)

Аннотация. Рассматривается задача навигации в зданиях сложной топологии. Предложены модели и алгоритмы построения эффективных маршрутов перемещения для лиц с разным уровнем доступа, в том числе в условиях нештатных ситуаций. Описаны математическая постановка и методы решения задач поиска оптимального пути «точка-точка» и маршрутов, включающих заданное множество целевых точек посещения. Разработанные алгоритмы решения задачи учитывают такие факторы, как текущее время, расписание доступности элементов инфраструктуры, права доступа, режим функционирования объекта, изменения внутренней организации здания. Предложен способ учета изменений состояния и правил построения маршрута путем интеграции с инженерными системами обеспечения надежности и безопасности эксплуатации зданий.

Ключевые слова: внутренняя топология здания; внутренняя навигация; надежность и безопасность инженерных систем; поддержка принятия решений; нештатные ситуации; Алгоритм Дейкстры; задача коммивояжера.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является технология построения оптимальных маршрутов перемещения внутри зданий с изменяющейся внутренней структурой. Изменения во внутренней структуре здания и доступности переходов происходят в результате периодических перепланировок из-за проводимых мероприятий, изменения назначения отдельных помещений, а также при срабатывании систем безопасности. Рассматриваемые объекты отличаются сложной топологией [1] и различной доступностью перемещений в зданиях для различных категорий пользователей.

В работе рассматриваются здания, имеющие значительные размеры по площади и многоэтажную организацию с развитой системой коридоров и межэтажных переходов, включающих лестницы, лифты, эскалаторы, подъемные механизмы для лиц с ограниченными возможностями и др., которым характерно массовое посещение людей, не обязательно знакомых со внутренним пространством, например, учебные учреждения, торговые и развлекательные центры, выставочные комплексы, промышленные объекты и т.п. [2]. Топология таких объектов часто меняется, что влияет на результаты расчета оптимальных маршрутов перемещения, равно как и астрономическое время влияет на доступность отдельных помещений, а нештатные ситуации на изменение состояния как штатных, так и аварийных переходов и выходов.

Существующие на рынке систем внутриобъектовой навигации решения основаны на применении соответствующих технических решений [3] или внутренней разметки [4] для определения фактического местоположения с учетом недостаточной точности или полного отсутствия сигналов систем глобального геопозиционирования [5], актуального не только для Российской Федерации. Также отечественные и зарубежные ученые активно занимаются вопросами навигации в многоэтажных зданиях [6].

Одной из актуальных проблем является быстрое определение места расположения источника опасности при срабатывании систем жизнеобеспечения, которое влияет на принятие решений по ликвидации аварийной ситуации и необходимости эвакуации. Эвакуация, как механизм парирования нештатных ситуаций, часто является вынужденной мерой в условиях отсутствия объективных данных при срабатывании сигнализации и приводит к ощутимым экономическим потерям. Так, по данным МВД [7], ложные срабатывания пожарной сигнализации в России составляют 41 %, при этом участие пожарных было необходимо лишь в 27 % случаев.

В основу решаемой задачи положена гипотеза о том, что внедрение предложенных моделей, основанных на классических алгоритмах определения кратчайшего пути [8], повысит эффективность работы инженерно-технических служб при обслуживании систем жизнеобеспечения, а поддержание базы данных в актуальном состоянии повысит оперативность нахождения местоположения источника сигнала тревоги, своевременную оценку сложившейся ситуации и обоснованность принимаемых решений в условиях нештатных ситуаций.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является повышение безопасности нахождения людей в закрытых помещениях. Локальной целью проекта является разработка моделей и алгоритмов функционирования системы внутренней навигации [8], обеспечивающих простоту актуализации данных о внутренней топологии; построение оптимальных маршрутов, учитывающих доступность перемещений на основе расписания, прав доступа [6] и оперативной обстановки на объекте.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математические модели решения задачи поиска оптимального маршрута точка-точка и оптимального маршрута обхода множества точек пространства объекта в условиях динамически меняющейся конфигурации внутреннего пространства зданий;
- разработать структуру данных для описания топологии внутреннего пространства здания, при которой доступ к любой точке пространства не ограничен;
- разработать способ описания и алгоритмы коррекции модели описания доступных перемещений в режиме штатной эксплуатации зданий на основе расписания работы отдельных помещений и прав доступа отдельных категорий лиц на основе их ролевых моделей;
- предложить способ коррекции графа доступных перемещений для случаев нештатных ситуаций, требующих частичной или полной эвакуации людей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для построения модели системы маршрутизации с учетом уровней доступа используется ориентированный граф, в котором вершины представляют ключевые элементы инфраструктуры здания, а ребра – пути между ними [8]. Такая модель отражает как физическую топологию, так и ограничения на перемещение в различные зоны.

Описание доступных перемещений в здании описывается в виде ориентированного графа:

$$G = (V, E, \omega_{ij}), \quad (1)$$

V – множество вершин, которые представляют помещения здания;

E – множество ребер, которые представляют пути между узлами;

ω_{ij} – вес ребра, который характеризует «стоимость» перемещения между узлами i и j .

Вес ребер в базовом случае рассчитывается как расстояние между узлами. Это позволяет учитывать время прохождения по данному узлу для различных пользователей системы, чья скорость перемещения учитывается моделью пользователя и может корректироваться в реальных условиях на основе фактического времени перемещения по маршруту.

В решении задачи предусмотрено, что пользователи имеют разные уровни доступа к помещениям и переходам между ними. Кроме того, фактическая доступность помещений и переходов определяется различными факторами: текущим временем; установленным расписанием; временной недоступностью, определяемой проведением различного рода работ; состоянием объекта в режиме нештатной ситуации, когда перемещение по данному участку маршрута имеет высокие риски травм или гибели людей, например, лифты, а перемещения через эвакуационные коридоры и выходы, напротив, становятся доступными. Для учета данных факторов исходный граф G модифицируется.

Для нахождения оптимального пути для каждой категории пользователей формируется индивидуальный граф $G' = (V', E', \omega'_{ij})$. Модификация производится по следующим критериям:

1. Исключаются недоступные узлы и связанные с ними ребра, не зависящие от категории пользователя, в том числе в зависимости от режима работы объекта.

2. Исключаются недоступные узлы и ребра для данной категории пользователя.

3. Исключаются узлы и ребра, недоступные по расписанию.

4. Исключаются узлы и ребра, временно недоступные для прохода.

5. Изменяется вес дуг, доступных пользователю, в соответствии с его уровнем доступа.

Математически это решается следующим образом:

$$V' = \{v_i \in V \mid state(v_i) = open, nodeTags(v_i) \cap userTags \neq 0\}; \quad (2)$$

$$E' = \{(v_i, v_j) \in E \mid v_j \in V' \mid edgeTags((v_i, v_j)) \cap userTags \neq 0\}, \quad (3)$$

$$\omega'_{ij} = f(\{(v_i, v_j) \in E \mid v_j \in V' \mid edgeTags((v_i, v_j)) \cap userTags \neq 0\}), \quad (4)$$

где

$state(v_i)$ – текущее состояние узла v_i (открыт или закрыт);

$nodeTags(v_i)$ – множество тегов доступа узла v_i ;

$edgeTags((v_i, v_j))$ – теги доступа, необходимые для перемещения по ребру;

$userTags$ – множество тегов доступа текущего пользователя;

$f()$ – функция изменения веса ребра, зависящая от категории пользователя.

Модифицированный граф $G' = (V', E', \omega'_{ij})$ содержит только те элементы, по которым пользователь может перемещаться, и веса, соответствующие правилам построения маршрута перемещения конкретного пользователя.

Для решения задачи поиска оптимального пути специалиста технических служб (далее – инженера) к неисправному оборудованию определяются узлы, соответствующий текущему местоположению инженера:

$$v_{start} \in V', \quad (5)$$

и целевая точка маршрута, как узел, соответствующий помещению, в котором находится предположительно неисправное оборудование, определяемое условием кратчайшего расстояния:

$$v_{end} = \arg \min_{v_i \in V} dist(v_i, D_f), \quad (6)$$

где

D_f – координаты неисправного объекта.

Решением задачи является P от v_{start} до v_{end} минимальной стоимости перемещения.

$$S = \sum_{(i,j) \in P} \omega'_{ij} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где

P – маршрут (последовательность узлов V' графа G'), по которому движется инженер.

ω_{ij} – вес ребра e_{ij} , входящего в маршрут.

Для поиска маршрута применяется алгоритм Дейкстры на фильтрованном графе [8].

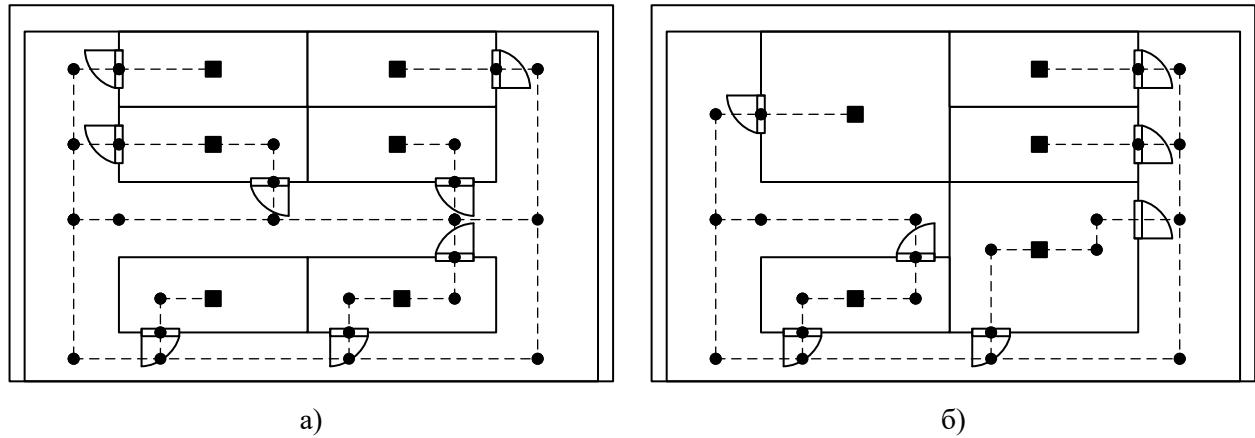
Если необходимо посетить несколько неисправных объектов (например, $\{D_{f1}, D_{f2}, \dots, D_{fm}\}$), каждому объекту сопоставляется ближайший узел $v_{fi} \in V'$, и решается обобщенная задача коммивояжера (*GTSP*) [9]:

$$Z = \sum_{(v_i, v_j) \in X} \omega_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где

$x \in \{0,1\}$ – переменная, равная 1, если дуга (v_i, v_j) входит в маршрут, иначе 0.

В ходе эксплуатации здания его топология изменяется: помещения могут добавляться, изменяться или закрываться (рис. 1). Для корректной работы системы маршрутизации требуется, чтобы описывающий ее базовый граф находился в актуальном состоянии.



а)

б)

Рис. 1. Пример изменения внутренней топологии здания:
а) до изменения; б) объединение двух пространств в одно

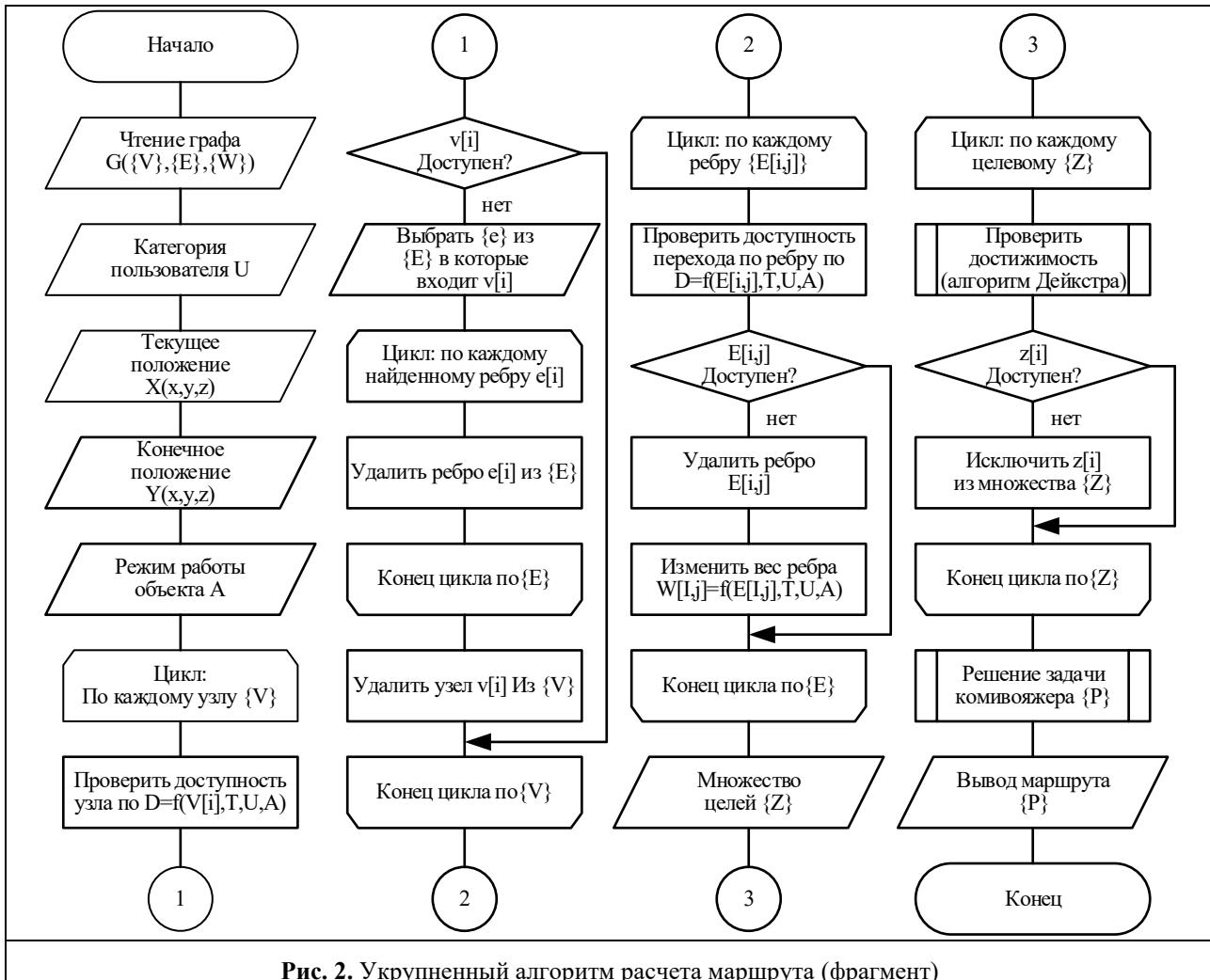
АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ

Представленный на рис. 2 алгоритм реализует адаптированную версию задачи коммивояжера с кластерами [9]. Алгоритм учитывает ограничения доступа и текущее состояние объектов здания и режим его работы.

Для построения маршрута система определяет текущие координаты пользователя или получает исходную точку, задаваемую, например, при планировании маршрута заранее.

Множество целевых точек задается множеством соответствующих целевых помещений, выбор которых обусловлен конкретной задачей. Доступность целевых помещений оценивается алгоритмом Дейкстры [10]. Выбор конечной точки маршрута также зависит от того, для какой категории пользователей решается задача, например, в случае планирования некоторого множества работ начальная и конечная точки маршрута совпадают с помещением, которое является его рабочим местом, в то время как при решении внеплановых задач началом маршрута является его текущее местоположение, а конечным – место возникновения неисправности. При этом в маршрут могут быть включены служебные помещения, которые придется посетить для получения инструмента, запасных частей и иного оборудования. Посещение таких помещений не подлежит оптимизации при планировании маршрута и включается в задачу как исходная точка отправления.

Множество узлов, необходимое обойти инженеру при выполнении плановых работ, формируется плановым заданием и оптимизируется путем перестановки таким образом, чтобы выполнялись критерии эффективности. В базовом варианте этим критерием служит минимально пройденное расстояние. Однако инженер при выполнении плановых работ по техническому обслуживанию и ремонту должен избегать перемещений через торговые залы и другие локации при наличии технических коридоров, а в случае нештатных ситуаций, наоборот, критерием эффективности является минимальное время прибытия в место возникновения сигнала тревоги для оценки ситуации и принятия решения о методах парирования отказа.



Решение данной задачи осуществляется изменением весов графа в зависимости от решаемой задачи и режима работы объекта.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ

Для оценки корректности разработанных моделей и алгоритмов реализован прототип информационной системы поддержки принятия решений при планировании маршрутов перемещения пользователей в зданиях сложной топологии с периодически изменяющейся конфигурацией. Система представляет собой совокупность подсистем, построенных по трехзвенной архитектуре: клиент – сервер приложений – сервер базы данных.

Формирование графа доступных перемещений осуществляется модулем «*Interior Guide Constructor*» [11]. Реализация модуля выполнена на языке программирования *JavaScript* с использованием языка гипертекстовой разметки *HTML*, языка описания стилей *CSS*, технологии *Canvas*, входящей в состав языка *HTML* с применением технологии обработки событий *Drag And Drop*. Хранение данных в первой версии приложения осуществлялось исключительно в формате *JSON*. В настоящее время файл исходных данных для построения маршрутного графа генерируется скриптом, написанным на языке программирования *PHP* из данных, сохраняемых в СУБД *MariaDB (MySQL)*. Такая организация позволила добиться адекватного времени перестройки маршрутов на стороне клиента, минимизируя нагрузку на сервер, что важно для работы системы в условиях нештатных ситуаций при выполнении множественных запросов, пользователей, количество которых может достигать нескольких десятков тысяч.

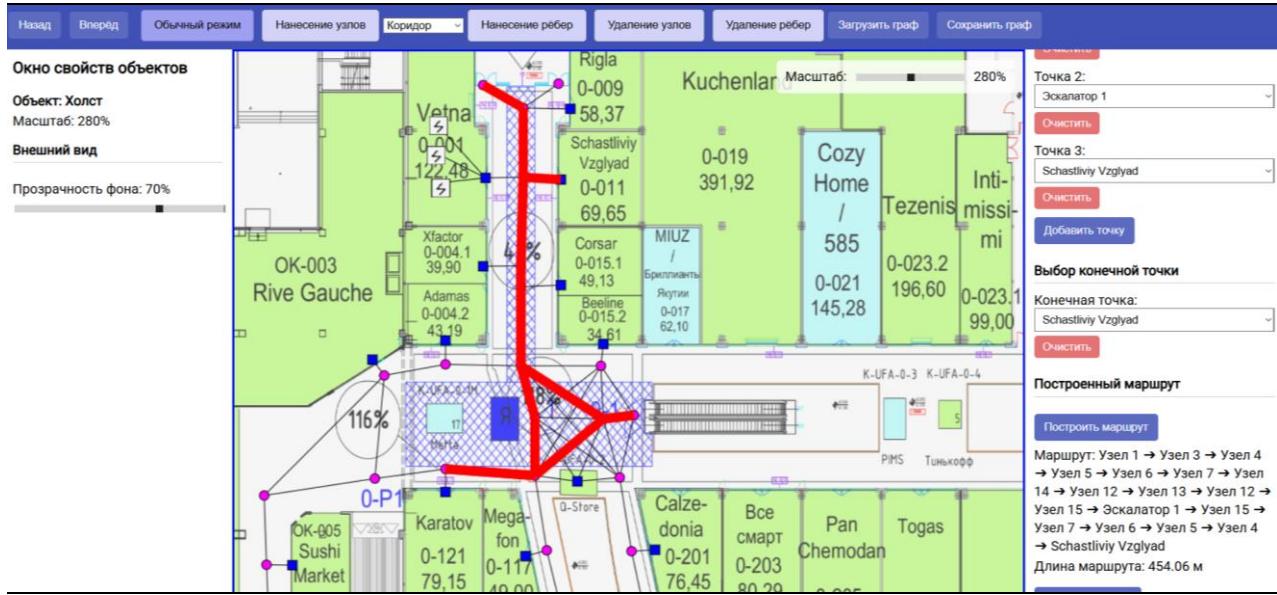


Рис. 3. Пример построения описания здания и расчета маршрута в *Interior Guide Constructor*

Основные возможности системы:

1. Создание цифровой модели здания: описание стен, помещений, пространств, уровней доступа, расписания, доступности в зависимости от режима работы объекта.
2. Формирование графа для систем навигации, учитывая наличия межэтажных переходов.
3. Определение кратчайшего расстояния по алгоритму Дейкстры (точка-точка) для решения задач оперативного поиска мест отказа.
4. Определение оптимального маршрута по заданным критериям оптимальности для задач планового технического обслуживания и ремонта инженерных систем.
5. Интерактивный пользовательский интерфейс, совместимый со всеми современными браузерами, поддерживающими стандарты *HTML5* и *CSS3*.

Разработанный прототип позволяет эффективно моделировать структуру здания, в режиме реального времени выполнять расчет и визуализацию на плане здания маршрутов перемещения для пользователей с разным уровнем доступа.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ

Для подтверждения практической ценности и эффективности разработанных моделей и алгоритмов маршрутизации был проведен численный эксперимент.

На построенной в рамках реализации проекта модели здания случайным образом выбраны 10 помещений, которые должен посетить инженер для решения задачи технического обслуживания, а именно – проверки работоспособности дымовых датчиков пожарной сигнализации. Критерием эффективности выбрано пройденное инженером расстояние. Объем работы оценивался согласно теоремам о планируемости задач в системах реального времени [12].

В первом случае последовательность перемещений определялась инженером на основе его представления об объекте. Длина этого маршрута составила 7612 метров.

Маршрут, рассчитанный системой, составил 6535 метров. Предложенный алгоритмом расчет предусматривал переходы между этажами здания не после завершения всех работ по этажу, как решил для себя инженер, а исходя из принципа получения кратчайшего расстояния, а следовательно, и минимальных затрат времени на работу, не имеющую результата.

Таким образом, алгоритм нашел решение, сокращающее перепробег инженера на 1080 метров, что дает экономию 14,2 %, по сравнению с планом инженера. Или по-другому, инженер

предложил решение на 16,5 % хуже. Во временном эквиваленте экономия затрат времени на перемещение по объекту составила примерно 20–30 минут за рабочий день.

Приведенная оценка эффективности результата работы алгоритма не является абсолютной и единственной и не доказывает преимущества перед человеком, но позволяет исключить ошибки в планировании работ, снизив непроизводительные затраты времени, в том числе на решение задачи планирования. Другой оценкой эффективности и способом оптимизации может выступить тонно-километр переносимых грузов, раннее время завершения работ, выполнение наибольшего объема работы и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ описания топологии зданий с изменяемой внутренней структурой, представляющей собой протяженные пространства с многоуровневой организацией и множеством межэтажных переходов. Описана математическая постановка и методы решения задачи построения эффективных маршрутов для пользователей с разным уровнем доступа в различных внешних условиях. Разработан алгоритм формирования графа доступных перемещений как функции множества параметров, таких как фактическое время прохождения по маршруту, уровень доступа, расписание работы отдельных локаций, режим работы объекта. Выполнена программная реализация разработанных моделей и алгоритмов, показавшая высокую эффективность по времени выполнения вычислительных процедур и результатов расчета, которая на элементарной процедуре обхода 10 случайных помещений показала решение на 14,2 лучше очевидного.

Результаты данной работы будут использованы для повышения эффективности планирования работ по техническому обслуживанию и ремонту элементов инженерных систем при эксплуатации зданий и сооружений. Эффективность применения системы может быть повышена путем интеграции системы с системами жизнеобеспечения здания, которые в реальном масштабе времени могли бы передавать данные о состоянии систем для своевременной их регистрации и визуализации отклонения на планах зданий. Вторым направлением продолжения данной работы является применение данной технологии для описания самих инженерных систем и визуализации их актуального состояния в виде 3D-моделей [13]. Решение такой задачи позволит проводить оценку состояния, мест и рисков возникновения неисправностей для задач обнаружения уязвимостей [14], а также визуализировать предстоящие мероприятия на плане здания для оценки объема предстоящих работ.

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: материалы XVIII Всероссийской молодежной научной конференции. Уфа, 2024. С. 843–849.
2. Охотников А. В., Кухта Ю. Б. Проектирование системы для навигации внутри здания со сложной иерархической структурой // Программные системы и вычислительные методы. 2021. № 4. С. 46–57. DOI: 10.7256/2454-0714.2021.4.37012. [Электронный ресурс]. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=37012 (дата обращения: 19.05.2025).
3. Naser El-Sheemy and You Li. Indoor navigation: state of the art and future // Satell Navig. 2021. Vol. 2:7. 23 p. DOI:10.1186/s43020-021-00041-3
4. Yongkui Li, Yan Zhang, Xiyu Pan, John E. Taylor. BIM-based determination of indoor navigation sign layout using hybrid simulation and optimization // Automation in Construction. 2022. Vol.139. 104243. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104243
5. 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.
6. Honghong Chen, Jie Yang, Zhanjun Hao. Research on indoor multi-floor positioning method based on LoRa // Computer Networks. 2024. Vol. 254. 110838. DOI: 10.1016/j.comnet.2024.110838.
7. Ложные пожарные тревоги в развлекательных, торговых и гостиничных помещениях // Интеллект Безопасность. [Электронный ресурс]. URL: <https://in-bez.ru/new/lozhnye-pozharnye-trevogi-v-razvlekatelnykh-torgovlykh-i-gostinichnykh-pomeshcheniyakh/> (дата обращения: 19.05.2025).
8. Ерлыкова М. С., Моргунова О. Н. Метод определения кратчайшего пути между вершинами графа для построения оптимального маршрута // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2021. Т. 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-opredeleniya-kratchayshego-puti-mezhdu-vershinami-grafa-dlya-postroeniya-optimalnogo-marshruta> (дата обращения: 19.05.2025).

9. Борознов В. О. Исследование решения задачи коммивояжера // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-resheniya-zadachi-kommivoyazhera> (дата обращения: 19.05.2025).
10. Лебедев С. С., Новиков Ф. А. Необходимое и достаточное условие применимости алгоритма Дейкстры // КИО. 2017. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neobhodimoe-i-dostatochnoe-uslovie-primenimosti-algoritma-deykstry> (дата обращения: 19.05.2025).
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663166. Российская Федерация. Interior Guide Constructor: № 2024665178: заявл. 16.05.2025: опубл. 27.05.2025 / Ш. М. Минасов, Э. И. Кальметьев, А. Е. Сергеева, Л. М. Мустаев, В. А. Глушенко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».
12. 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.
13. Павлов С. В., Христодуло О. И., Гизатуллин А. Р., Соколова А. В. Обработка двумерной пространственной информации в составе 3D модели промышленного объекта // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13. № 1. С. 152–158. EDN VEDWOP. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25140478> (дата обращения: 30.05.2025).
14. Павлов С. В., Христодуло О. И., Гизатуллин А. Р., Соколова А. В. Информационная поддержка управления уязвимостью сложных распределенных систем на основе обработки пространственной информации // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 2(29). DOI 10.26102/2310-6018/2020.29.2.023. EDN DZUNVQ. [Электронный ресурс]. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44086587_48046700.pdf (дата обращения: 30.05.2025).

ОБ АВТОРАХ

КАЛЬМЕТЬЕВ Эмиль Ильгизович, студ. каф. информатики.

СЕРГЕЕВА Анастасия Евгеньевна, студ. каф. информатики.

МИНАСОВ Шамиль Маратович, доцент, к. техн. наук., доцент кафедры информатики, доц. каф. ГИС.

METADATA

Title: Models and algorithms for optimizing personnel movement routes for equipment maintenance and repair in engineering systems under changing building interior layouts

Author: E.I. Kalmetev¹, A.E. Sergeeva², Sh.M. Minasov³

Affiliation:

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

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

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 3 (34), pp. 41-48, 2025. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: The problem of navigation in buildings of complex topology is considered. Models and algorithms for constructing efficient travel routes for persons with different levels of access, including in abnormal situations, are proposed. The mathematical formulation and methods of solving the problems of searching for the optimal path “point-to-point” and routes including a given set of target points of visitation are described. The developed algorithms for solving the problem take into account such factors as: current time, schedule of availability of infrastructure elements, access rights, mode of functioning of the object, changes in the internal organization of the building. The method of taking into account changes in the state and rules of route construction by integrating with engineering systems of reliability and safety of building operation is proposed.

Key words: internal building topology, internal navigation, reliability and safety of engineering systems, decision support, abnormal situations, Dijkstra's Algorithm, the traveling salesman problem.

About authors:

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

SERGEEEVA Anastasia Evgenievna, student, Dept. of Informatics (UUST).

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