

Разработка алгоритма оптимизации календарно-сетевого планирования строительства метро с учетом ограниченных ресурсов на основе теории графов

Developing a graph-based algorithm for optimising scheduling and network planning as part of subway construction subject to limited resources

Собин А.Е.^{1*}
Sobin A.E.

¹АО ЧУ ВО «Московский финансово-юридический университет МФЮА», Москва, Российская Федерация
Moscow University of Finance and Law MFUA, Moscow, Russian Federation
*view7goog757@gmail.com



Собин А.Е

Резюме. С увеличением масштабов городской застройки и расширением агломераций становится все более важным создание устойчивых, эффективно функционирующих и экологически безопасных систем транспорта, обеспечивающих удобство и доступность. В частности, строительство метрополитенов играет ключевую роль в улучшении доступности и стимулировании экономического прогресса. Учитывая высокую сложность и финансовые затраты, связанные с реализацией таких крупных проектов, необходимы инновационные методы планирования для уменьшения рисков и эффективного использования ресурсов. **Цель** исследования заключается в разработке передового алгоритма планирования, основанного на принципах теории графов, который способен максимально эффективно управлять ресурсами. **Методы.** В работе представлены результаты всестороннего изучения актуальных в области улучшения процессов планирования в строительстве и интеграции теории графов для повышения управляемости комплексных систем, в том числе и при строительстве подземного транспорта. На протяжении исследования внимание сосредоточено на монографическом методе анализа, который раскрывает каждый элемент изучаемой проблематики, и использовании рефлексивного метода для осмысления полученной информации и выведения аргументированных заключений. Сочетание данных методов позволило не только оценить, но и подтвердить преимущества предложенной оптимизационной стратегии, сфокусированной на повышении эффективности и адаптивности в строительных проектах, особенно в части строительства метрополитенов, с учетом специфики и требований реальной практики. **Результаты.** Отмечается существенная роль графовой теории в повышении эффективности строительства подземного метрополитена. Применение этого математического подхода позволяет усовершенствовать систему управления проектами, учитывая ограничения по ресурсам. Теория графов выступает здесь как ключевой элемент, который структурирует и упорядочивает сложные процессы, а также обеспечивает быструю адаптацию к любым изменениям в ходе строительства. Особенность разработанного алгоритма заключается в том, что он способствует максимальной эффективности распределения ресурсов, уменьшению времени простоя и избеганию задержек на различных этапах проекта. Таким образом, повышается точность планирования и общая экономическая эффективность строительных работ. В работе также уделено внимание аспекту многоцелевой оптимизации. Этот подход позволяет добиться идеального баланса сроков, бюджета и качества строительства, что немаловажно для подобных масштабных и ресурсоемких проектов, как строительство метрополитенов. **Выводы.** Эффективное использование предложенного алгоритма существенно повысит управленческую аккуратность, сократит расходы и время, требуемое на реализацию строительных проектов, делая данный метод не только актуальным, но и необходимым для успешного осуществления крупных строительных задач. В результате, открываются новые возможности для исследований и внедрения данных подходов в градостроительное планирование и создание крупномасштабной инфраструктуры. Данная статья будет особенно интересна специалистам в области урбанистики, инженерам-строителям, исследователям, занимающимся оптимизацией процессов, а также менеджерам проектов, которые отвечают за планирование и успешную реализацию крупномасштабных строительных проектов.

Abstract. The growing urban development and expanding metropolitan areas emphasise the importance of sustainable, efficient, and environmentally friendly transportation systems that

provide convenience and accessibility. In particular, the construction of subways plays a key role in improving accessibility and stimulating economic progress. Given the high complexity and financial costs that such large projects entail, innovative planning methods are needed to reduce risks and use resources efficiently. This study **aims** to develop an advanced graph-based planning algorithm that would be able to manage resources as efficiently as possible.

Methods. The paper presents the results of a comprehensive study of topical publications as regards the improvement of civil engineering processes and integration of the graph theory to enhance the controllability of complex systems, e.g., as part of subway construction. The study focused on the monographic method of analysis that reveals each element of the examined problems, and the use of the reflexive method to comprehend the obtained information and draw substantiated conclusions. The combination of the above methods allowed not only to evaluate, but also to confirm the advantages of the proposed optimisation strategy focused on improving the efficiency and adaptability in construction projects, especially in the construction of subways, taking into account their specificity and real-world requirements. **Results.** The paper notes the significant role of the graph theory in improving the efficiency of subway construction. The application of this mathematical method allows improving the project management system taking into account the limited resources. The graph theory acts as the key element that brings structure and order to complex processes, as well as ensures rapid adaptation to any changes in the course of the construction activities. The developed algorithm is special in that it contributes to a most efficient resource allocation, reduced downtime and eliminates delays at various stages of a project. Thus, a higher accuracy of planning and the overall economic efficiency of construction activities are achieved. The paper also delves into multiobjective optimisation. This method enables a perfect balance of construction time, budget, and quality, which is important for such large-scale and resource-intensive projects as subway construction. **Conclusions.** An efficient use of the proposed algorithm will significantly improve the quality of management, reduce the costs and time required for the delivery of construction projects, which makes the method not only relevant, but also vital to their success. That opens up new opportunities for research and application of the above methods in urban planning and deployment of major infrastructures. The paper will be of particular interest to urban planners, civil engineers, process optimisation researchers, as well as project managers responsible for the planning and successful delivery of large-scale civil engineering projects.

Ключевые слова: теория графов, оптимизация строительства, планирование ресурсов, строительство метрополитенов, календарно-сетевое планирование, управление проектами, алгоритмы оптимизации.

Keywords: graph theory, construction optimisation, resource planning, subway construction, scheduling and network planning, project management, optimization algorithms.

Для цитирования: Собин А.Е.. Разработка алгоритма оптимизации календарно-сетевого планирования строительства метро с учетом ограниченных ресурсов на основе теории графов // Надежность. 2025. №1. С. 19-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-19-27>

For citation: Sobin A.E. Developing a graph-based algorithm for optimising scheduling and network planning as part of subway construction subject to limited resources. Dependability 2025;1:19-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-19-27>

Поступила: 27.07.2024 / **После доработки:** 16.12.2024 / **К печати:** 05.03.2025

Received on: 27.07.2024 / **Revised on:** 16.12.2024 / **For printing:** 05.03.2025

Введение

В контексте ускоренного градостроительства и роста городских агломераций, роль улучшения транспортной сети, в частности, строительство метрополитенов, несомненно велика. Это закладывает основу для быстрого и эффективного передвижения населения и, следовательно, для социального и экономического прогресса. В этом аспекте острая потребность в разработке новых подходов к оптимизации планирования, основанных на теории графов, становится не просто значимой, но и стратегически важной задачей. Такие методы могут значительно сократить как временные затраты, так и финансовые издержки в строительстве, выступая

ключевым инструментом в борьбе с бюджетными и временными ограничениями. Создание инновационного алгоритма для календарно-сетевого планирования, особенно учитывая ограниченность ресурсов, обещает повышение точности и экономичности в строительных мегапроектах. Важно, что такой инструмент позволяет оперативно адаптироваться к переменчивым условиям, что является критически важной способностью в динамичной среде строительных проектов. Оптимизация распределения ресурсов, минимизация простоев, эффективное использование рабочих и техники, и предотвращение задержек в работе проектов – эти преимущества делают данное направление выдающимся

не только в академическом, но и в прикладном исследовании, открывая новые горизонты для индустрии строительства и урбанистики.

1. Обзор источников

В сфере оптимизационного планирования теория графов получила признание за свою эффективность в управлении организационными процессами и экономии времени, что подтверждается научными наблюдениями О. Распопова [1]. Особо важное значение теория графов приобретает в строительной отрасли, где точное планирование и координация действий имеют решающее значение. Исследование С. Туманова, опубликованное в 2023 году, демонстрирует, что применение современных информационных систем моделирования в сочетании с сетевыми графами значительно улучшает процесс планирования [2]. Кроме того, Р.Б. Трегубов внес свой вклад, разработав инновационный аналитический инструментарий, который объединяет графовые модели и вероятностный анализ для усовершенствования оптимизации многослойных систем [3]. Параллельные вычисления, как отмечается в работах С. Назарова и А. Барсукова, выпущенных в 2021 году, также продвинулись благодаря применению сетевого анализа [4]. В области стратегического планирования строительных проектов И.Л. Киевский в 2022 году предложил новые методики, нацеленные на повышение стабильности систем [5]. Теория графов также находит все более широкое применение в таких областях как военная инженерия, представленная трудами М. Нгуена и И. Иванова [6], экономика, логистика, машинное обучение, где О. Пичугина [7] выделила ее роль в оптимизации протоколов, и сервисный сектор, исследованный С.А. Кропивенцевой [8]. Тем не менее, существует потребность в дополнительных исследованиях, направленных на разработку алгоритмов для улучшения стратегии строительства метрополитенов, что остается важной и малоизученной темой.

2. Методы

В данной работе было выполнено глубокое исследование в области оптимизации процессов планирования в сфере строительства, с особым вниманием к строительству подземного транспорта. Изучение актуальных научных работ привело к интеграции принципов теории графов, что способствует повышению контроля над сложными строительными системами. Основопологающим в данной работе явился монографический подход, который позволил детализированно рассмотреть каждую составляющую проблемы. В дополнение к этому, рефлексивный метод дал возможность глубже проанализировать собранные данные и сформулировать обоснованные выводы. Эта комбинация исследовательских методов не только способствовала анализу, но также подтвердила значи-

мость предложенной стратегии оптимизации. Данная стратегия направлена на улучшение эффективности и адаптивности управления строительными проектами. Она особенно актуальна для строительства метрополитенов, учитывая их особенности и практические требования.

3. Результаты

Изучение влияния графовой теории на эффективность строительных процессов, особенно при возведении метрополитенов, стало ключевым в данном исследовании. Этот математический инструмент обеспечивает улучшение управления проектами на фоне ресурсных ограничений. Внедрение теории графов приводит к лучшей структуризации проектных процессов, создавая условия для гибкой реакции на изменения, что критически важно при выполнении строительных работ. Специально разработанный алгоритм, основанный на графовой теории, направлен на оптимизацию использования ресурсов, сокращение времени простоев и уменьшение риска задержек на всех этапах работы. Это в свою очередь ведет к повышению точности в планировании и эффективности строительных задач в экономическом аспекте. Кроме того, в работе уделено пристальное внимание многоцелевой оптимизации. Применение этого подхода позволяет достичь оптимального соотношения между сроками выполнения работ, затратами и качеством готового объекта, что особенно важно для таких крупных и требующих значительных ресурсов проектов, как строительство метрополитенов.

4. Обсуждение

Применение теории графов играет ключевую роль в современных методиках календарно-сетевого планирования строительства. Как показывает анализ исследований М.А. Фетисова и коллег, опубликованный в 2021 году, оптимизация расписания с учетом ключевых параметров, включая сроки выполнения работ, бюджет проекта и пропускную способность, может значительно повысить эффективность строительных проектов [9]. Вклад авторов заключается в выработке методологической основы, позволяющей анализировать и адаптировать планирование к изменяющимся обстоятельствам. Сетевой анализ стал неотъемлемой частью в области инвестиционного планирования строительства, обеспечивая тщательное структурирование и кодирование проектных задач. Исследование Е. Буценко и А. Шорикова, осветило, как сетевые графики способствуют синхронизации различных проектных операций с параметрами плана, что существенно упрощает процесс управления сложными строительными проектами [10]. Объектно-ориентированные подходы, раскрытые А. Аничкиным и В. Семеновым, открыли новые возможности в проектировании планировочных программ [11]. Эти фрейм-

ворки стимулировали развитие продвинутых систем управления проектами, адаптированных к специфике и требованиям современного строительства. Кроме того, исследователи под руководством А.В. Катаева разработали математические модели, которые обеспечивают принятие наилучших решений о распределении задач между исполнителями [12]. Такие модели учитывают структуру проектной сети, что позволяет максимизировать эффективность проектной деятельности с точки зрения времени и ресурсов. Научное исследование, выполненное Т. Саламой и О. Мозелхи в 2019 году, затрагивает методику многоцелевой оптимизации, которая особенно ценна при работе с нестабильными или неопределенными условиями, характерными для строительных площадок.

Авторами предложен подход, основанный на генетических алгоритмах, позволяющий минимизировать сроки, затраты и периоды простоя в процессе строительства [13]. Такой инструмент становится незаменимым в ситуациях, когда существует риск колебаний производительности, неоднородности доступных ресурсов или их ограниченности. Многоцелевые алгоритмы применимы для адаптации к меняющимся обстоятельствам строительства метрополитенов, где необходимо

сбалансировать использование ресурсов и следовать жестким срокам.

Научная статья, опубликованная М.-Ю. Ченгом и коллегами, вносит значимый вклад в понимание того, как улучшить управление несколькими ресурсами в рамках разных строительных проектов. Авторы представили концепцию использования техники поиска дискретных симбиотических организмов для минимизации нестабильности в использовании ресурсов. Они указывают на важность устранения необходимости постоянного найма и увольнения рабочих в ответ на изменяющиеся потребности проекта. Акцентируется внимание на том, что разработка стратегий оптимального распределения ресурсов является ключевым элементом для повышения эффективности [14]. В области строительного планирования анализ, проведенный Ю. Тангом и его командой, вносит существенный вклад, особенно в тему оптимизации линейных графиков строительства с использованием техник программирования ограничений. Эти методы позволяют прецизионно настраивать и управлять сложными связями, возникающими между множеством задач, особенно актуальных в масштабных проектах, каковым является строительство метрополитенов [15].

Табл. 1. Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации планирования строительства метрополитенов

Метод	Описание	Преимущества	Недостатки	Приложения
Критический путь (CPM)	Определяет наиболее длинный путь через сетевую диаграмму проекта, определяя ключевые задачи.	Простота понимания и использования, точное планирование сроков.	Не учитывает изменения ресурсов и условий.	Планирование времени выполнения проекта
Программирование ограничений	Решает планирование задач, учитывая сложные зависимости и ограничения ресурсов.	Гибкость в управлении изменениями, подходит для сложных проектов.	Сложно настраивать, требует специализированного ПО.	Гибкое планирование проектов
Генетические алгоритмы	Используют методы эволюционной оптимизации для нахождения решений в больших и сложных пространствах.	Эффективны для многоцелевой оптимизации, хороши в сложных условиях.	Вычислительно затратны, результаты могут быть неоднозначными.	Многоцелевая оптимизация расписаний
Линейное программирование	Используется для минимизации или максимизации линейной целевой функции при заданных линейных ограничениях.	Точное решение для оптимизации распределения ресурсов.	Ограничен комплексными условиями, которые не всегда линейны.	Оптимизация распределения ресурсов
Симуляция Монте-Карло	Применяется для оценки рисков и неопределенностей путем моделирования различных сценариев.	Помогает оценить риски и вероятности различных исходов проекта.	Не предоставляет конкретного плана действий, основан на случайных выборках.	Анализ рисков и неопределенностей
Перестановочные множества	Исследует возможные перестановки задач для оптимизации планирования.	Подходит для решения задач с несколькими последовательностями и ограничениями.	Может быть сложным в реализации и анализе.	Улучшение эффективности и сокращение сроков

Табл. 2. Алгоритм оптимизации календарно-сетевого планирования строительства метро с учетом ограниченных ресурсов на основе теории графов: этапы разработки, методы, цели и инструменты (авторская разработка)

Этап	Действия/Методы	Цели/Задачи	Инструменты
Формализация задачи	Определение узлов и ребер графа	Представление каждой задачи или этапа строительства как узла графа; установление зависимостей между этапами	Графические редакторы, специализированное ПО для моделирования графов
	Ввод ограничений ресурсов	Распределение ресурсов (рабочая сила, оборудование, материалы) среди задач	Системы управления проектами, ПО для управления ресурсами
Применение теории графов	Топологическая сортировка	Упорядочивание задач для планирования последовательности работ	Алгоритмические библиотеки, такие как NetworkX или Graph-tool
	Поиск критического пути	Определение наиболее времязатратных последовательностей, минимизация общего времени проекта	Программное обеспечение для критического пути, например, Microsoft Project
	Оптимизация распределения ресурсов	Минимизация времени выполнения и стоимости, учитывая ограничения	Оптимизационное ПО, например, MATLAB или R
Интеграция с методами оптимизации	Линейное программирование	Оптимизация распределения ресурсов, соблюдение ограничений	Солверы линейного программирования, например, Gurobi или CPLEX
	Многоцелевая оптимизация (напр. генетические алгоритмы)	Нахождение оптимального баланса между стоимостью, временем и качеством строительства	Средства разработки генетических алгоритмов, например, DEAP в Python
Прототипирование и тестирование	Разработка программного обеспечения	Моделирование и тестирование алгоритма на данных реальных проектов	Интегрированные среды разработки (IDE), например, Visual Studio или PyCharm
	Анализ результатов и корректировка алгоритма	Улучшение алгоритма на основе анализа данных и обратной связи	Системы анализа данных и машинного обучения, например, Python с библиотеками Pandas и Scikit-learn
Итерация и улучшение	Постоянное улучшение алгоритма	Адаптация и оптимизация алгоритма в ответ на изменяющиеся условия и результаты применения	Платформы для управления версиями, например, Git; системы непрерывной интеграции

Программирование ограничений служит ключом к гармонизации работы разнообразных этапов проекта, осуществляя тем самым плавное движение к его завершению без излишних задержек.

Исследование, проведенное И. Бакри и коллегами, внесло значимый вклад в понимание процесса планирования в строительстве, особенно акцентируя внимание на важности интеграции методов буферизации и планирования в условиях неопределенности. Традиционные методы планирования часто недооценивают значимость потенциальных рисков и неопределенностей, характерных для динамичной строительной отрасли, в частности, при строительстве метрополитена. Создание запасов и использование надежных алгоритмов планирования делают возможным минимизировать риски, связанные с неожиданными обстоятельствами, укрепляя устойчивость проектов перед лицом изменчивых условий [16].

В сфере практик планирования выделяется методика определения графика проекта с помощью периодического планирования, базирующегося на размерах партий (Batch-Size-Based Repetitive Scheduling Method, BRSM), разработанная специалистами Е. Шим и Б. Ким. Этот подход упрощает составление графиков и поддается адаптации для специфических условий метростроения. Он направлен на эффективную корректировку плановых процедур, что способствует повышению общей эффективности управления проектами [17]. Дополнительно, идеи превентивного планирования, озвученные Х.А. Ал-нассери и Р. Аулином, акцентируют внимание на стратегическом учете будущих изменений и возможностей. Подход предусматривает интеграцию потенциальных будущих событий в планы, что позволяет опережать необходимость принятия решений и совершения действий, чтобы избежать отклонений от изначальных планов.

Применение данных стратегий в области строительства метрополитенов способствует точному управлению неопределенностями и предотвращению возможных проблем [18]. Исследование алгоритмов для оптимизации планирования процессов строительства инфраструктуры метрополитена охватывает разработку и проверку разнообразных стратегий, основанных на принципах теории графов. Важной целью этих стратегий является рационализация распределения ограниченных ресурсов и временных рамок. Основной задачей такого подхода является уменьшение общих сроков и финансовых затрат на строительные работы, повышая тем самым эффективность всего проекта (табл. 1).

Применение алгоритмов оптимизации, основанных на теории графов, в процессах календарного и сетевого планирования при строительстве метрополитенов способствует значительному улучшению управленческих процессов. Такие алгоритмы становятся ключевыми в деле минимизации общих расходов и снижения продолжительности строительных этапов. Однако для достижения наилучших результатов выбор метода должен базироваться на детальном анализе конкретных особенностей проекта, включая ограничения по ресурсам и степень сложности предстоящих работ. Конечным этапом в анализе существующих методологий в области строительства метрополитенов является разработка инновационного алгоритма (табл. 2).

Представленный алгоритм, полученный в результате глубокого изучения тем мультикритериальной оптимизации, рационального распределения ресурсов, ограничений в планировании и стратегий управления неопре-

деленностями, обещает внести значительный вклад в улучшение практик календарно-сетевого планирования. Нововведение опирается на концепции, заимствованные из теории графов и анализа современных исследований, и направлено на обеспечение большей эффективности в решении специфических задач, связанных со строительством метрополитенов. Таким образом, этот подход предлагает более стратегическое и экономически оправданное использование ресурсов при строгом соблюдении графика работ. Разработаем модель для анализа алгоритмов улучшения календарного планирования в проектах. Эта модель будет включать в себя серию задач с определенными между ними связями. Применим Python и библиотеку NetworkX для построения и анализа направленного графа, который отражает структуру задач. В ходе работы будет использован алгоритм для выявления наиболее важного пути, который определяет критические точки в рамках проектного планирования. Задачи строительства метро, включая время выполнения и зависимости: разработка проекта (*A*, 20 дней), подготовка стройплощадки (*B*, 10 дней), туннелирование (*C*, 30 дней), укладка рельсов (*D*, 15 дней), строительство станций (*E*, 40 дней), электромонтажные работы (*F*, 25 дней), тестирование и пусконаладочные работы (*G*, 20 дней); *B* зависит от *A*, *C* зависит от *B*, *D* и *E* зависят от *C*, *F* зависит от *E*, *G* зависит от *F*. Напишем код для создания графа, определения критического пути и симуляции выполнения проекта (рис. 1).

Программа предназначена для построения модели графа, которая описывает ряд взаимосвязанных задач. Она не только выявит критический путь, но и даст

```
import networkx as nx
# Создание направленного графа
G = nx.DiGraph()
# Добавление узлов с временем выполнения как атрибут
tasks = {
    'A': 20, 'B': 10, 'C': 30, 'D': 15, 'E': 40, 'F': 25, 'G': 20
}
G.add_nodes_from(tasks.items(), label='duration')
# Добавление зависимостей (рёбер)
dependencies = [('A', 'B'), ('B', 'C'), ('C', 'D'), ('C', 'E'), ('E', 'F'), ('F', 'G')]
G.add_edges_from(dependencies)
# Вычисление критического пути
def compute_critical_path(G):
    # Расчет веса каждой задачи как отрицательного времени выполнения для использования в алгоритме поиска кратчайшего пути
    for node in G:
        G.nodes[node]['weight'] = -G.nodes[node]['duration']
    # Поиск кратчайшего пути с учетом «весов» задач
    path_length, path = nx.single_source_bellman_ford(G, source='A', target='G', weight='weight')
    return -path_length, path # Возвращаем положительное значение длительности
# Выполнение расчета
critical_duration, critical_path = compute_critical_path(G)
print(«Критический путь:», critical_path)
print(«Общая длительность критического пути:», critical_duration, «дней»)
# Тестирование изменений в зависимостях
G.remove_edge('C', 'D')
G.add_edge('B', 'D')
critical_duration, critical_path = compute_critical_path(G)
print(«Новый критический путь после изменения зависимостей:», critical_path)
print(«Новая общая длительность критического пути:», critical_duration, «дней»)
```

Рис. 1. Код для создания графа, определения критического пути и симуляции выполнения на Python

возможность анализировать влияние модификаций взаимозависимости задач на общий период реализации проекта. Полученные данные сравниваются в контексте «до» и «после» внесенных корректировок, что позволяет оценить эффективность произведенных изменений на ход проектных работ.

Для демонстрации эффективности предложенного алгоритма рассмотрим модельную задачу, отражающую процесс планирования строительства метро. Исходные данные для расчета:

- разработка проекта (A) – 20 дней;
- подготовка стройплощадки (B) – 10 дней (зависит от A);
- туннелирование (C) – 30 дней (зависит от B);
- укладка рельсов (D) – 15 дней (зависит от C);
- строительство станций (E) – 40 дней (зависит от C);
- электромонтажные работы (F) – 25 дней (зависит от E);
- тестирование и пусконаладочные работы (G) – 20 дней (зависит от F).

Процесс расчета включает несколько ключевых шагов, начиная с анализа различных этапов проекта и их влияния друг на друга. Каждый этап моделируется как отдельный элемент (узел) и связан с другими этапами стрелками, обозначающими их взаимозависимость, создавая структуру, известную как граф задач. Граф строится с применением информации о продолжительности и взаимосвязях каждого этапа. Следующий шаг – определение критического пути с помощью специального вычислительного метода. Критический путь представляет собой самую продолжительную цепочку задач, которая определяет минимальный срок завершения проекта в целом. Алгоритм в этом этапе проверяет все возможные маршруты задач в графе, суммирует длительность каждой задачи и выделяет самый длительный путь – критический. Финальный этап включает оптимизацию распределения ресурсов. Цель здесь – перераспределить ресурсы по задачам, соблюдая заданные ограничения для уменьшения временных и финансовых затрат. Оптимизация зависит от анализа узких мест в проекте, особенно на критическом пути, что помогает ускорить общее время реализации проекта. Граф задач был визуализирован с использованием би-

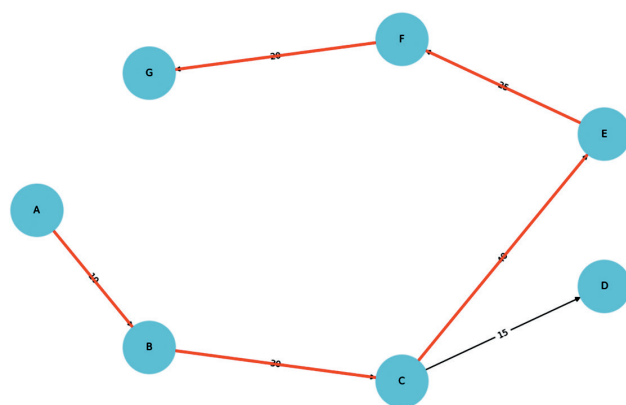


Рис. 2. Граф задач и критический путь

блиотек Python. Красным цветом выделен критический путь, а значения указывают продолжительность задач. Визуализация позволяет легко выявить узкие места проекта и принять решения по оптимизации (рис. 2).

Выявлен критический путь: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$.

Общая длительность проекта по критическому пути составила 145 дней.

Применение предложенного алгоритма позволяет эффективно планировать и управлять крупномасштабными проектами, такими как строительство метро, за счет точного анализа взаимозависимостей задач и оптимального использования ресурсов.

Заключение

Итак, применение теории графов в оптимизации календарно-сетевого планирования является мощным инструментом, который предоставляет возможности для повышения производительности и оптимизации расходов в процессе реализации масштабных строительных проектов, включая разработку метрополитенов. Такой подход способствует более глубокому пониманию и управлению проектами, открывая дорогу к значительному улучшению процессов планирования и исполнения.

Библиографический список

1. Raspopov O.S. The application of graph theory and automata to solve dynamics problems Steinbach system // Science and Transport Progress. 2010. No. 34. Pp. 136-141. DOI: 10.15802/stp2010/9237
2. Туманов С.Л., Гущина Ю.В., Макрушин Н.С. и др. Информационное моделирование на этапе планирования строительства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2023. № 23(3). С. 30-36. DOI: 10.14529/build230304
3. Tregubov R.B. Composite method of reliability research for hierarchical multilayer routing systems // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2016. No. 5(16). Pp. 879-892. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-879-892
4. Назаров С., Барсуков А. Оптимизация параллельных вычислений бортовых систем реального времени. Часть 2 // Электроника НТБ. 2021. № 1(202). С. 130-136. DOI: 10.22184/1992-4178.2021.202.1.130.136
5. Киевский И.Л., Аргунов С.В., Жаров Я.В. и др. Алгоритмизация систем планирования, управления и обработки информации в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 11. С. 14-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24
6. Нгуен М.К., Иванов И.Н. Направления повышения эффективности управления эксплуатацией военной техники вьетнамской народной армии // Вестник университета. 2017. № 11. С. 11-16. DOI: 10.26425/1816-4277-2017-11-11-16
7. Pichugina O.S. Optimization over the general signed permutation set of permutations // System research and

information technologies. 2017. No. 4. Pp. 74-96. DOI: 10.20535/srit.2308-8893.2017.4.07

8. Kropiventseva S.A., Sedova M.A. Reducing the duration of service for passengers of departure flight and evaluating the cost of the service process // *Intellect. Innovation. Investments*. 2019. Vol. 8. Pp. 98-105. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-8-98

9. Фетисова М.А., Халымова Т.А., Серегин М.Ю. и др. Анализ исторического развития методов оптимизации планирования в строительстве // *Тенденции развития науки и образования*. 2021. № 75(1). С. 150-152. DOI: 10.18411/lj-07-2021-34

10. Бученко Е.В., Шориков А.Ф. Сетевое моделирование процесса управления инвестиционным проектированием и его приложения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2016. № 233(6). С. 233-244. DOI: 10.5862/je.233.24

11. Аничкин А.С., Семенов В.А. Объектно-ориентированный каркас для программной реализации приложений теории расписаний // *Труды Института системного программирования РАН*. 2017. № 29(3). С. 247-296. DOI: 10.15514/ispras-2017-29(3)-14

12. Катаев А.В., Катаева Т.М., Макарова Е.Л. Управление проектами: математические модели оптимального назначения исполнителей проектных работ // *Известия Саратовского университета. Новая серия*. 2016. № 3(16). С. 294-299. DOI: 10.18500/1994-2540-2016-16-3-294-299

13. Salama T. Moselhi O. Multi-objective optimization for repetitive scheduling under uncertainty // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2019. No. 7(26). Pp. 1294-1320. DOI: 10.1108/ecam-05-2018-0217

14. Cheng M.-Y., Prayogo D., Tran D.-H. Optimizing Multiple-Resources Leveling in Multiple Projects Using Discrete Symbiotic Organisms Search // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016. No. 30(3). DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000512

15. Tang Y., Liu R., Wang F., Sun Q., Kandil A. Scheduling Optimization of Linear Schedule with Constraint Programming // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2017. No. 33(2). Pp. 124-151. DOI: 10.1111/mice.12277

16. Bakry I., Moselhi O., Zayed T. Optimized scheduling and buffering of repetitive construction projects under uncertainty // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2016. No. 23(6). Pp. 782-800. DOI: 10.1108/ecam-05-2014-0069

17. Shim E., Kim B. Batch-Size Based Repetitive Scheduling Method (BRSM) // *International Journal of Construction Education and Research*. 2014. No. 10(2). Pp. 140-156. DOI: 10.1080/15578771.2013.826753

18. AlNasseri H., Aulin R. Assessing Understanding of Planning and Scheduling Theory and Practice on Construction Projects // *Engineering Management Journal*. 2015. No. 27(2). Pp. 58-72. DOI: 10.1080/10429247.2015.1035963

References

1. Raspopov O.S. The application of graph theory and automata to solve dynamics problems Steinbach system. *Science and Transport Progress* 2010;34:136-141. DOI: 10.15802/stp2010/9237.

2. Tumanov S.L., Gushchina Y.V., Makrushin N.S., Risunov A.R., Kalinovskiy S.A. Information modeling at the stage of construction planning. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture* 2023;23(3):30-36. DOI: 10.14529/build230304. (in Russ.)

3. Tregubov R.B. Composite method of reliability research for hierarchical multilayer routing systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 2016;5(16):879-892. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-879-892.

4. Nazarov S., Barsukov A. Optimization of parallel computing for onboard real-time systems. Part 2. *Electronics: Science, Technology, Business* 2021;1:130-136. DOI: 10.22184/1992-4178.2021.202.1.130.136. (in Russ.)

5. Kievsky I.L., Argunov S.V., Zharov Ya.V. et al. [Algorithmisation of planning, management, and processing of information in civil engineering]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo* 2022;11:14-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. (in Russ.)

6. Nguyen M.C., Ivanov I. Directions of improving the efficiency of operation management of military engineering of the Vietnamese People's Army. *Vestnik Universiteta* 2017;(11):11-16. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2017-11-11-16>. (in Russ.)

7. Pichugina O.S. Optimization over the general signed permutation set of permutations. *System research and information technologies* 2017;4:74-96. DOI: 10.20535/srit.2308-8893.2017.4.07.

8. Kropiventseva S.A., Sedova M.A. Reducing the duration of service for passengers of departure flight and evaluating the cost of the service process. *Intellect. Innovation. Investments* 2019;8:98-105. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-8-98.

9. Fetisova M.A., Khalymova T.A., Seregin M.Yu. et al. [Analysis of the historical development of methods for optimising planning in construction]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* 2021;75(1):150-152. DOI: 10.18411/lj-07-2021-34. (in Russ.)

10. Butsenko E.V., Shorikov A.F. Network modelling of the process of managing investment planning and its applications. *St. Petersburg Polytechnical University Journal* 2016;233(6):233-244. DOI: 10.5862/je.233.24. (in Russ.)

11. Anichkin A.S., Semenov V.A. Object-oriented framework for software development of scheduling applications. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS* 2017;29(3):247-296. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-14. (in Russ.)

12. Kataev A.V., Kataeva T.M., Makarova E.L. Project Management: Mathematical Models of Optimal Executors' Appointment for Project Works. *Izvestiya Saratovskogo*

universiteta. *Novaya seriya* 2016;3(16):294-299. DOI: 10.18500/1994-2540-2016-16-3-294-299. (in Russ.)

13. Salama T. Moselhi O. Multi-objective optimization for repetitive scheduling under uncertainty. *Engineering, Construction and Architectural Management* 2019;7(26):1294-1320. DOI: 10.1108/ecam-05-2018-0217.

14. Cheng M.-Y., Prayogo D., Tran D.-H. Optimizing Multiple-Resources Leveling in Multiple Projects Using Discrete Symbiotic Organisms Search. *Journal of Computing in Civil Engineering* 2016;30(3). DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000512.

15. Tang Y., Liu R., Wang F., Sun Q., Kandil A. Scheduling Optimization of Linear Schedule with Constraint Programming. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 2017;33(2):124-151. DOI: 10.1111/mice.12277.

16. Bakry I., Moselhi O., Zayed T. Optimized scheduling and buffering of repetitive construction projects under uncertainty. *Engineering, Construction and Architectural Management* 2016;23(6):782-800. DOI: 10.1108/ecam-05-2014-0069.

17. Shim E., Kim B. Batch-Size Based Repetitive Scheduling Method (BRSM). *International Journal of Construction Education and Research* 2014;10(2):140-156. DOI: 10.1080/15578771.2013.826753.

18. AlNasser H., Aulin R. Assessing Understanding of Planning and Scheduling Theory and Practice on Construction Projects. *Engineering Management Journal* 2015;27(2):58-72. DOI: 10.1080/10429247.2015.1035963.

Сведения об авторе

Собин Артем Евгеньевич, аспирант кафедры «Информационные системы и технологии» АО ЧУ ВО «Московский финансово-юридический университет МФЮА», view7goog757@gmail.com; Публикации: Вакуров Артем Евгеньевич (была смена фамилии в 2023 году): Бюлле-

тень науки и практики (2018, Т.4, №8, с.148-153; 2019, Т.5, №6, с.234-238; 2019, Т.5, №6, с.239-244; 2019, Т.5, №6, с.245-253; 2019, Т.5, №6, с.254-258), БСТ: Бюллетень строительной техники (2018, №12 (1012), с.52-53), Собин Артем Евгеньевич: Инфокоммуникационные технологии (2023, Т.21, №3, с.62-70).

About the author

Artem E. Sobin, postgraduate student, Department of Information Systems and Technologies, Moscow University of Finance and Law (MFUA), view7goog757@gmail.com; Publications: **Artem E. Vakurov** (there was a change of name in 2023): Bulletin of Science and Practice (2018, Vol. 4, No. 8, pp. 148-153; 2019, Vol. 5, No. 6, pp. 234-238; 2019, Vol. 5, No. 6, p. 239-244; 2019, Vol. 5, No. 6, pp. 245-253; 2019, Vol. 5, No. 6, pp. 254-258), BST: Bulletin stroitelnoy tekhniki (2018, No.12 (1012), pp. 52-53), **Artem E. Sobin**: Info-communication Technologies (2023, Vol. 21, No. 3, pp. 62-70).

Вклад автора в статью

Автором проведен анализ литературы, посвященной современным подходам к планированию строительства метрополитенов. На основании изученных источников была сформирована концептуальная основа работы, включающая ключевые принципы теории графов. Разработан алгоритм календарно-сетевого планирования на основе теории графов, выполнена его адаптация к реальным условиям проектирования. Проведены расчеты, подтверждающие эффективность предложенной методики, обобщены результаты и сделаны выводы.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.