

УДК 519.863

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.027](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.027)

Сравнение методов оптимизации в имитационной модели сложных организационно-технических систем

С.М. Бекетов✉, Д.А. Зубкова, С.Г. Редько

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Резюме. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности принимаемых управленческих решений в сложных организационно-технических системах. Проблема настоящего исследования заключается в выборе наиболее подходящего метода оптимизации для конкретных задач организационных систем. Целью статьи является сравнение современных методов оптимизации сложных организационно-технических систем, в частности, в модели транспортной системы. Особое внимание уделено минимизации целевой функции, учитывающей такие параметры, как пассажиропоток, время ожидания пассажиров, загрузка транспортного средства и влияние на дорожную ситуацию. В исследовании был проведен анализ подходящих методов оптимизации и выполнена программная реализация подходов к оптимизации для транспортной системы на языке программирования Python. Практическая часть позволяет оценить эффективность каждого метода с точки зрения результатов целевой функции, адекватности подобранных параметров модели и времени выполнения алгоритма. Результаты показали, что методы роя частиц и дифференциальной эволюции обеспечивают наилучшую минимизацию целевой функции с оптимально подобранными параметрами интервала движения, скорости движения и вместимости транспортного средства, однако данные методы оптимизации требуют большого времени на вычисления. Материалы статьи представляют практическую ценность для специалистов в области оптимизации процессов и транспортного планирования, предлагая рекомендации по выбору методов оптимизации в зависимости от целей и условий задачи.

Ключевые слова: методы оптимизации, организационно-техническая система, симплекс-метод, метод отжига, метод двойного отжига, метод дифференциальной эволюции, метод роя частиц.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 075-03-2024-004 от 17.01.2024).

Для цитирования: Бекетов С.М., Зубкова Д.А., Редько С.Г. Сравнение методов оптимизации в имитационных моделях сложных организационно-технических систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1665> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.027

Comparison of optimization methods in simulation models of complex organizational and technical systems

S.M. Beketov✉, D.A. Zubkova, S.G. Redko

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg,
the Russian Federation*

Abstract. The relevance of the study is due to the need to improve the effectiveness of management decisions in complex organizational and technical systems. The problem of this study is to choose the most appropriate optimization method for specific tasks of organizational systems. The purpose of the article is to compare modern methods of optimization of complex organizational and technical systems,

in particular, in the model of the transport system. Special attention is paid to minimizing the target function, which takes into account such parameters as passenger traffic, passenger waiting time, vehicle loading and the impact on the traffic situation. The study analyzed suitable optimization methods and implemented software implementation of optimization approaches for the transport system in the Python programming language. The practical part allows evaluating the effectiveness of each method in terms of the results of the objective function, the adequacy of the selected model parameters and the execution time of the algorithm. The results showed that the methods of particle swarm and differential evolution provide the best minimization of the objective function with optimally selected parameters of the range of motion, speed and capacity of the vehicle, however, these optimization methods require a lot of time for calculations. The materials of the article are of practical value for specialists in the field of process optimization and transport planning, offering recommendations on the choice of optimization methods depending on the goals and conditions of the task.

Keywords: optimization methods, organizational and technical system, simplex method, annealing method, double annealing method, differential evolution method, particle swarm method.

Acknowledgements: The research is funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (contract No. 075-03-2024-004 dated 17.01.2024).

For citation: Beketov S.M., Zubkova D.A., Redko S.G. Comparison of optimization methods in simulation models of complex organizational and technical systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1665> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.027 (In Russ.).

Введение

Оптимизация играет ключевую роль в современных исследованиях и практической деятельности, выступая в качестве основного инструмента для повышения эффективности и продуктивности сложных организационно-технических систем. В данном случае речь идет о таких системах, которые обеспечивают как техническую обработку данных, так и математическое моделирование с учетом различных вычислительных экспериментов [1]. Оптимизация проводится в различных отраслях и видах деятельности, включая такие сферы, как логистика [2], финансы [3], управление проектами [4] и инженерия [5]. Существует множество методов оптимизации, которые позволяют достигать наилучших решений в заданных условиях.

Методы оптимизации могут варьироваться от классических алгоритмов, таких как симплекс-метод, до более современных и сложных, таких как генетические алгоритмы и методы роевого интеллекта [6]. Каждый из них имеет свои особенности, достоинства и недостатки, которые необходимо учитывать в зависимости от конкретной задачи и условий. Например, симплекс-метод хорошо зарекомендовал себя в решении задач линейного программирования, в том числе многомерных, то есть с несколькими переменными [7]. С другой стороны, методы, такие как рой частиц и дифференциальная эволюция, обладают высоким потенциалом для поиска глобального оптимума, но могут требовать значительных вычислительных ресурсов и времени [8].

В условиях возрастающей сложности транспортных систем и требований к их оптимизации [9], сравнительное исследование различных методов позволяет не только определить их эффективность в конкретных задачах, но и выработать рекомендации по их применению в зависимости от условий и требований. Таким образом, данная работа представляет собой вклад в область оптимизации моделей в целом и транспортных систем в частности, предлагая анализ и практическое руководство по выбору наиболее подходящих методов для решения задач поставленной сложности.

Оптимизация транспортных систем является важной задачей в сфере логистики и городской инфраструктуры, так как решает проблему планирования поездок транспортных средств и обеспечивает эффективное распределение ресурсов.

Современные транспортные системы сталкиваются с множеством сложностей, таких как увеличение плотности городского населения, растущий пассажиропоток и необходимость интеграции новых видов транспорта [10]. В связи с этим, анализ для последующего применения более эффективных методов оптимизации становится все более актуальной задачей.

Транспортные системы представляют собой сложные, многокомпонентные структуры, где эффективность зависит от множества факторов, включая вместимость транспортного средства, максимальное время и временные окна и т. д. [11]. Для оптимизации этих систем можно учитывать множество различных аспектов, начиная от маршрутизации и расписания движения, до показателей воздействия на окружающую среду [12]. Важность оптимизации возрастает по мере усложнения транспортных сетей и увеличения требований к качеству обслуживания. В этой связи, выбор оптимального метода оптимизации становится критически важным, так как от него зависит как качество, так и скорость принятия решений.

Целью данной статьи является сравнение различных методов оптимизации в имитационных моделях сложных организационно-технических систем, в частности, на примере модели транспортной системы. Рассматриваются шесть методов: симплекс-метод, метод отжига, метод двойного отжига, метод дифференциальной эволюции и метод роя частиц. Анализ проводится с точки зрения минимизации целевой функции, которая учитывает ключевые параметры транспортной системы, такие как пассажиропоток, время ожидания, загрузка транспортного средства и его влияние на дорожную обстановку.

Материалы и методы

Для решения задачи минимизации целевой функции использовались следующие методы оптимизации: симплекс-метод, метод отжига, метод двойного отжига, метод дифференциальной эволюции и метод роя частиц. В Таблице 1 представлены их описание и особенности применения.

Таблица 1 – Методы оптимизации
Table 1 – Optimization methods

Метод	Описание	Применение
Симплекс-метод	Классический метод линейного программирования, который широко используется для решения задач минимизации и максимизации линейных целевых функций при наличии линейных ограничений [13].	Метод хорошо применим к линейным целевым функциям и нечетким транспортным задачам [14].
Метод отжига	Стохастический метод, основанным на принципах физического процесса отжига, в ходе которого вещество постепенно охлаждается, чтобы достичь состояния с минимальной энергией. Этот метод применим для поиска глобального минимума целевой функции, особенно в задачах, где пространство решений является сложным и содержит множество локальных минимумов. Был выбран благодаря способности избегать локальных минимумов и применимости к сложным задачам [15].	Данный метод способен избежать локальных минимумов и применим к задачам маршрутизации [16].

Таблица 1 (продолжение)

Table 1 (continued)

Метод двойного отжига	Стохастический алгоритм глобальной оптимизации, который включает локальный алгоритм поиска, также учитывает как большие, так и малые возмущения в решении задач [17].	Метод предназначен для поиска экстремумов функции и оптимизации сложных многомерных функций [18].
Метод дифференциальной эволюции	Метод дифференциальной эволюции относится к классу эволюционных алгоритмов и использует механизмы, схожие с процессами естественного отбора, для поиска оптимального решения. Данный метод эффективен в задачах с непрерывными параметрами, где требуется глобальная оптимизация в многомерных пространствах [19].	Метод дифференциальной эволюции также часто встречается в транспортных и логистических задачах [20].
Метод роя частиц	Метод роя частиц основывается на моделировании коллективного поведения группы частиц, которые взаимодействуют между собой и с окружающей средой. Алгоритм использует информацию о лучших найденных решениях каждой частицы и всего роя в целом для обновления положения частиц в пространстве решений, что позволяет постепенно приближаться к оптимуму [21].	Данный метод достаточно прост в реализации, поддается параллелизации, а также эффективно справляется с задачами глобальной оптимизации [22].

Вышеперечисленные методы будут применены на модели транспортной сети города, которая позволяет провести имитационное моделирование движения общественного транспорта. В модели реализованы функции назначения новых типов транспортных средств на разные маршруты и присвоения расписаний. По завершении моделирования результаты представляются в виде информационной панели с общей информацией по всей сети или по отдельным маршрутам. Все результаты сравниваются с полученными данными из ранее проведенных итераций моделирования. Результаты позволяют оценить эффект от изменений качественного и количественного состава парка транспортных средств на автобусных маршрутах для выбора и обоснования изменений.

В рамках исследования для анализа и сравнения эффективности различных методов оптимизации была разработана математическая модель транспортной системы, в которой целевая функция формируется с учетом нескольких ключевых факторов, влияющих на качество и эффективность работы системы. Основной задачей было минимизировать целевую функцию, которая представляет собой взвешенную сумму следующих компонентов: пассажиропоток, время ожидания, загрузка транспортного средства и влияние на дорожную обстановку (являются выходными данными модели транспортной сети города). Каждая из этих переменных отражает важный аспект функционирования транспортной системы, что позволяет учитывать не только внутренние параметры, такие как загрузка и скорость транспортных средств, но и внешние факторы, связанные с общей дорожной ситуацией и пассажиропотоком.

Целевая функция в данном исследовании имеет следующий вид:

$$F(P, T, Z, D) = k_1 \cdot \frac{P_0}{P} + k_2 \cdot \frac{T}{T_0} + k_3 \cdot |0,75 - Z| + k_4 \cdot (1 - |D|),$$

где F – целевая функция, значение которой минимизируется; k_1, k_2, k_3, k_4 – весовые коэффициенты, которые определяют вклад каждого из факторов в общую функцию; P – средний пассажиропоток, представляющий собой количество пассажиров, перевозимых за определенное время; P_0 – базовое значение пассажиропотока; T – среднее время ожидания пассажиров на остановке; T_0 – базовый показатель ожидания пассажиров; Z – средний коэффициент загрузки транспортного средства; D – среднее влияние на дорожную обстановку, которое выражается через такие параметры, как задержки на дорогах и общее увеличение времени поездки из-за перегрузок на маршруте.

Для проведения экспериментов использовались следующие входные данные: интервал движения транспортных средств варьировался от 10 до 20 минут; вместимость транспортных средств находилась в диапазоне от 20 до 80 человек; скорость транспортных средств изменялась от 15 до 60 км/ч. Данные параметры варьировались в указанных диапазонах по равномерному распределению. Переменные были выбраны с учетом реальных условий работы городских транспортных систем, что позволило моделировать различные сценарии их работы и учитывать возможные изменения в пассажиропотоке, времени ожидания, загрузке и дорожной обстановке.

В качестве выходных данных исследование включало значение целевой функции для каждого метода оптимизации, оптимальные значения интервала движения, вместимости и скорости транспортного средства, а также время, затраченное на выполнение каждого алгоритма. Эти данные позволили оценить как эффективность каждого метода в достижении минимального значения целевой функции, так и их производительность с точки зрения времени выполнения.

Результаты

Для моделирования движения автобусов и оптимизации параметров транспортной системы была использована среда программирования Python. В качестве основных инструментов использовались библиотеки `numpy`, `wrapt`, `wrapdisc`, `ruswarms` и `scipy`, что обеспечило функциональную гибкость и масштабируемость приложения. Основные этапы реализации включают предобработку данных, моделирование и оптимизацию.

Параметризация модели производилась с учетом использования целочисленных значений, поскольку вместимость должна содержать целое число, а интервал и скорость движения не будут высчитываться с точностью до запятой во время осуществления самого движения и составления расписания движения автобусов. Поскольку программная реализация методов оптимизации не позволяла производить поиск только среди целочисленных значений, была использована надстройка с помощью библиотеки `wrapt`. Она позволила выполнить обертку параметров модели в целочисленный поиск и использовать базовые, доступные методы оптимизации.

Большинство методов оптимизации содержится в оптимизационной библиотеке `scipy`, которая является базовой, известной библиотекой, содержащей основные методы оптимизации. Множество других локальных библиотек основывается на программной реализации подходов из `scipy`, дополняя их своими расширениями. Для запуска симплекс-метода использовалась функция `scipy.optimize.minimize()`, которая включает в себя такие параметры, как функция минимизации, начальные значения параметров функции, константные значения, метод минимизации, граничные значения параметров и другие. Для применения симплекс-метода необходимо, чтобы задача была

представлена в линейной форме. В данной работе проведена линеаризация исходной задачи методом замены переменных, которые представляют собой нелинейные переменные. С этой целью использовался алгоритм минимизации Nelder-Mead, который показал наилучший результат в сравнении с другими возможными методами данной функции `scipy.optimize.minimize()`.

Для запуска остальных методов использовать отдельные функции, такие как: `scipy.optimize.anneal()` для метода отжига; `scipy.optimize.dual_annealing()` для метода двойного отжига; `scipy.optimize.differential_evolution()` для метода дифференциальной эволюции.

Данные функции содержат аналогичные параметры, однако добавляются еще такие параметры, как максимальное количество итераций и посещений, а также максимальное значение функций минимизации для выхода их алгоритма для `scipy.optimize.anneal()` и `scipy.optimize.dual_annealing()`. Для `scipy.optimize.differential_evolution()` добавляются такие параметры, как максимальное количество итераций и размер популяции.

Для программной реализации метода роя частиц использовался алгоритм из библиотеки `pyswarms`. В частности, с помощью класса `GlobalBestPSO()` была задана оптимизационная модель (экземпляр класса), а далее использован внутренний метод `optimize()`.

Все методы имеют различные типы входных и выходных данных, поэтому для приведения к общему типу были заданы дополнительные функции, преобразовывающие результаты к единому виду.

Реализация методов оптимизации в Python с использованием указанных библиотек обеспечивает высокую гибкость и адаптивность системы моделирования. Подходы к предобработке данных, моделированию и оптимизации позволили эффективно исследовать различные сценарии транспортной системы и находить оптимальные решения для улучшения ее функционирования. Для каждого из методов были получены результаты, которые затем проанализированы с точки зрения значений целевой функции, подобранных параметров транспортной системы и времени выполнения алгоритмов. Результаты моделирования представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Средние результаты моделирования
Table 2 – Average simulation results

Метод оптимизации	Целевая функция	Интервал	Вместимость ТС	Скорость ТС	Время (сек)
Симплекс-метод	0,007584	16	39	40	13
Метод отжига	0,007007	17	40	45	109
Метод двойного отжига	0,007191	19	41	53	87
Метод дифференциальной эволюции	0,006799	19	39	40	699
Метод роя частиц	0,006147	19	40	39	2598

Симплекс-метод показал значение целевой функции, равное 0,007584, при этом оптимальные параметры включали интервал движения в 16 минут, вместимость транспортного средства 39 человек и скорость 40 км/ч. Время выполнения алгоритма составила всего 13 секунд. Данные результаты свидетельствуют о высокой скорости работы симплекс-метода и его способности находить решения с хорошими значениями

целевой функции. Однако, несмотря на низкое время выполнения, симплекс-метод не смог достичь таких низких значений целевой функции, как более сложные алгоритмы.

Метод отжига показал результаты лучше, чем симплекс-метод, достигнув значения целевой функции 0,007007. Оптимальные параметры включали интервал движения 17 минут, вместимость 40 человек и скорость транспортного средства 45 км/ч. Время выполнения алгоритма увеличилось до 109 секунд. Метод показал способность находить решения с лучшими значениями целевой, однако потребовал больше времени на выполнение. Метод отжига эффективен для задач, где требуется достижение лучшего глобального решения, но при этом допускается увеличение времени вычислений.

Метод двойного отжига продемонстрировал еще более низкое значение целевой функции, равное 0,007191. Оптимальные параметры включали интервал движения 19 минут, вместимость 41 человек и скорость 53 км/ч. Время выполнения составило 87 секунд, что оказалось меньше, чем у метода отжига, несмотря на его большую сложность. Двойной отжиг показал хорошее соотношение между качеством решения и временем выполнения, что делает его перспективным методом для задач с высокими требованиями к оптимизации при умеренных временных ограничениях.

Метод дифференциальной эволюции достиг значения целевой функции 0,006799, что является одним из лучших результатов в данном исследовании. Оптимальные параметры были следующими: интервал движения 19 минут, вместимость 39 человек, скорость 40 км/ч. Однако, время выполнения алгоритма оказалось достаточно большим – 699 секунд. Это указывает на высокую эффективность метода дифференциальной эволюции в нахождении глобального оптимума, особенно в задачах со сложной структурой и множеством переменных. Тем не менее, большой объем вычислений делает этот метод менее предпочтительным в условиях ограниченного времени.

Метод роя частиц продемонстрировал наилучшее значение целевой функции среди всех методов, равное 0,006147. Оптимальные параметры включали интервал движения 19 минут, вместимость 40 человек и скорость 39 км/ч. Однако для достижения такого результата алгоритм потребовал 2598 секунд, что значительно превышает время выполнения других методов. Этот результат подтверждает, что метод роя частиц способен находить решения с минимальной целевой функцией, но для этого требуется значительно больше времени. Этот метод может быть применим в задачах, где качество решения является приоритетом, а время выполнения не является критичным.

Методы роя частиц и дифференциальной эволюции оказались наиболее эффективными с точки зрения минимизации целевой функции, что делает их предпочтительными для задач, требующих наивысшего качества решения. Однако, оба метода требуют значительно больше времени на выполнение, что может ограничить их применимость в задачах с жесткими временными ограничениями. Симплекс-метод и метод отжига, напротив, обеспечивают быстрое выполнение и приемлемые результаты, что делает их более подходящими для использования в ситуациях, где время является критическим фактором. Симплекс-метод, несмотря на свою широкую применимость, показал хорошие результаты по времени, но худшие результаты по значению целевой функции, что указывает на необходимость его более тщательной настройки или использования в специфических задачах, где его преимущества могут быть более очевидны. Результаты исследования подчеркивают важность выбора метода оптимизации в зависимости от конкретных требований задачи: качества решения, времени выполнения и доступных вычислительных ресурсов.

Обсуждение

В данном исследовании основное внимание уделено минимизации целевой функции, учитывающей среднее время ожидания, количество пассажиров, загрузку и влияние на дорожную остановку. Однако существуют и другие виды целевых функций, которые могут быть актуальны в контексте оптимизации организационных систем [23]. Например, максимизация пассажиропотока, где могут быть применимы методы оптимизации, такие как генетические алгоритмы или методы роя частиц, которые могут эффективно обрабатывать большие объемы данных и находить оптимальные решения для сложных систем [24]. Также возможна минимизация эксплуатационных затрат, где могут быть использованы методы линейного программирования, которые хорошо подходят для задач с линейными ограничениями и целевыми функциями [25].

Преимущества данной статьи заключаются в применении широкого спектра методов оптимизации для моделирования и оптимизации параметров транспортной системы, используя современные библиотеки Python. Было проведено сравнение различных методов оптимизации, что позволяет получить более полную картину эффективности каждого метода в контексте оптимизации транспортных систем.

Важно отметить, что результаты данного исследования специфичны для рассматриваемой модели транспортной системы. Различные модели могут иметь различные структуры и параметры, что может привести к иным результатам при использовании тех же методов оптимизации. Например, в моделях с более сложными маршрутами и динамическими изменениями пассажиропотока могут потребоваться более сложные алгоритмы или дополнительные настройки параметров.

Перспективы дальнейших исследований включают расширение набора параметров, использование методов многокритериальной оптимизации, реализацию моделей в реальном времени, применение машинного обучения, проведение анализа чувствительности, валидацию с реальными данными, интеграцию с другими системами и экономическую оценку предложенных решений. Эти направления помогут создать более точные и эффективные модели, способные адаптироваться к изменениям и обеспечивать оптимальную работу транспортных систем.

Заключение

Оптимизация является ключевым аспектом для эффективного функционирования различных систем, включая транспортные, логистические и инженерные. В представленном исследовании была проведена оценка шести методов оптимизации, применяемых к транспортной системе города. Результаты показали, что каждый метод имеет свои преимущества и ограничения в зависимости от специфики задачи и временных ограничений.

Методы роя частиц и дифференциальной эволюции продемонстрировали наилучшие результаты с точки зрения минимизации целевой функции, что подтверждает их высокую эффективность в поиске глобального оптимума. Однако, эти методы требуют значительно больше времени на выполнение по сравнению с симплекс-методом или методом отжига.

Таким образом, выбор метода оптимизации зависит от конкретных условий задачи: если приоритетом является скорость, стоит обратить внимание на классические методы, такие как симплекс-метод; если же требуется наивысшее качество решения и допустимо значительное время вычислений, более сложные алгоритмы, такие как рой частиц и дифференциальная эволюция, будут предпочтительными. Вклад данного исследования заключается в сравнении методов оптимизации, что позволит сделать

осознанный выбор при решении задач в области транспортных систем и других сложных многомерных структур.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Pospelov K.N., Burlutskaya Z.V., Gintciak A.M., Troshchenko K.D. Multiparametric Optimization of Complex System Management Scenarios Based on Simulation Models. *International Journal of Technology*. 2023;14(8):1748–1758. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i8.6832>
2. Xin L., Xu P., Manyi G. Logistics Distribution Route Optimization Based on Genetic Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022;2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8468438>
3. Rebstrost P., Lloyd S. Quantum Computational Finance: Quantum Algorithm for Portfolio Optimization. *KI – Künstliche Intelligenz*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s13218-024-00870-9>
4. Beketov S.M., Pospelov K.N., Redko S.G. A Human Capital Simulation Model in Innovation Projects. *Control Sciences*. 2024;(3):16–25. <https://doi.org/10.25728/cs.2024.3.2>
5. Mencarelli L. et al. A review on superstructure optimization approaches in process system engineering. *Computers & Chemical Engineering*. 2020;136. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106808>
6. Родзин С.И., Курейчик В.В. Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор). *Кибернетика и программирование*. 2017;(3):51–79.
Rodzin S.I., Kureichik V.V. Theoretical issues and modern problems concerning development of cognitive bioinspiral optimization algorithms (a survey). *Kibernetika i programmirovaniye = Cybernetics and Programming*. 2017;(3):51–79. (In Russ.).
7. Дианов С.В., Калашников К.Н., Ригин В.А. Поиск путей оптимального пространственного размещения объектов инфраструктуры здравоохранения: обзор методического инструментария. *Проблемы развития территории*. 2021;25(2):108–127. <https://doi.org/10.15838/ptd.2021.2.112.7>
Dianov S.V., Kalashnikov K.N., Rigin V.A. Search for Ways of Optimal Spatial Placement of Healthcare Infrastructure Facilities: a Review of Methodological Tools. *Problemy razvitiya territorii = Problems of Territory's Development*. 2021;25(2):108–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.15838/ptd.2021.2.112.7>
8. Курейчик В.В., Родзин С.И. Биоэвристики, инспирированные фауной (обзор). *Информационные технологии*. 2023;29(11):559–573. <https://doi.org/10.17587/it.29.559-573>
Kureychik V.V., Rodzin S.I. Bio-Heuristics Inspired by Fauna (Review). *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2023;29(11):559–573. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/it.29.559-573>
9. Чернышев Ю.О., Кубил В.Н. Обзор динамических задач маршрутизации транспорта. *Программные продукты и системы*. 2020;(3):491–501. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.131.491-501>
Chernyshev Yu.O., Kubil V.N. A review of dynamic vehicle routing problems. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*. 2020;(3):491–501. (In Russ.). <https://doi.org/10.15827/0236-235X.131.491-501>
10. He Z., Liu Q., Zhao P. Challenges of passenger and freight transportation in mega-city regions: A systematic literature review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2022;16. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100730>

11. Чернышев Ю.О., Кубил В.Н., Требухин А.В. Обзор нечетких задач маршрутизации транспорта. *Advanced Engineering Research*. 2020;20(3):325–331. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-325-331>
Chernyshev Yu.O., Kubil V.N., Trebukhin A.V. Overview of fuzzy vehicle routing problems. *Advanced Engineering Research*. 2020;20(3):325–331. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-325-331>
12. De La Torre R., Corlu C.G., Faulin J., Onggo B.S., Juan A.A. Simulation, Optimization, and Machine Learning in Sustainable Transportation Systems: Models and Applications. *Sustainability*. 2021;13(3). <https://doi.org/10.3390/su13031551>
13. Wu D., Lisser A. A deep learning approach for solving linear programming problems. *Neurocomputing*. 2023;520:15–24. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.053>
14. Sangeetha V., Vijayarangam J., Thirisangu K., Elumalai P. Simplex based solution for a fuzzy transportation problem. *Malaya Journal of Matematik*. 2021;S(1):393–396.
15. Алехин Р.А., Кубарьков Ю.П., Закамов Д.В., Умяров Д.В. Обзор метаэвристических методов оптимизации, применяемых при решении электроэнергетических задач. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2019;(3):6–19.
Alekhin R.A., Kubarkov Yu.P., Zakamov D.V., Umyarov D.V. Overview of metaheuristic optimization techniques applied to solving power engineering problems. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2019;(3):6–19. (In Russ.).
16. Wei L., Zhang Z., Zhang D., Leung S.C.H. A simulated annealing algorithm for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*. 2018;265(3):843–859. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.035>
17. Lee J., Perkins D. A simulated annealing algorithm with a dual perturbation method for clustering. *Pattern Recognition*. 2021;112. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107713>
18. Viazovychenko Y., Larin O. Stochastic Optimization Algorithms for Data Processing in Experimental Self-heating Process. In: *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering 2020 – Synergetic Engineering, 28–30 October 2020, Kharkiv, Ukraine*. Cham: Springer; 2021. pp. 644–653. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_55
19. Opara K.R., Arabas J. Differential Evolution: A survey of theoretical analyses. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019;44:546–558. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.06.010>
20. Пацей Н.Е., Рябычина О.П. Применение эволюционных алгоритмов для поиска оптимального маршрута. *Проблемы инфокоммуникаций*. 2020;(1-1):38–43.
Patsey N.E., Ryabychina O.P. Applying of evolutionary algorithms for searching the optimal route. *Problemy infokommunikatsii*. 2020;(1-1):38–43. (In Russ.).
21. Gad A.G. Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications: A Systematic Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022;29(5):2531–2561. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4>
22. Yan F., Wang Y. Modeling and Solving the Vehicle Routing Problem with Multiple Fuzzy Time Windows. In: *ICMSEM 2017: Proceedings of the Eleventh International Conference on Management Science and Engineering Management, 28–31 July 2017, Kanazawa, Japan*. Cham: Springer; 2017. pp. 847–857. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59280-0_69

23. Смоленцева Т.Е. Методы определения целевой функции организационных систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;6(3):143–152. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2018.22.3.011>
Smolentseva T.E. Methods of determining objective function organizational systems. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2018;6(3):143–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2018.22.3.011>
24. Буйлова М.В. Формирование маршрутных сетей городского общественного транспорта. *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2022;(1):45–52.
Buylova M.V. Development of urban public transport route networks. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2022;(1):45–52. (In Russ.).
25. Ермошин Н.А., Романчиков С.А. Минимизация автотранспортных издержек в условиях неопределенности состояния дорожной сети. В сборнике: *Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее: Сборник статей 2-й Международной научно-технической конференции, 22 мая 2020 года, Курск, Россия*. Курск: Юго-Западный государственный университет; 2020. С. 119–122.
Ermoshin N.A., Romanchikov S.A. Minimizatsiya avtotransportnykh izderzhok v usloviyakh neopredelennosti sostoyaniya dorozhnoi seti. In: *Avtomobili, transportnye sistemy i protsessy: nastoyashchee, proshloe i budushchee: Sbornik statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 22 May 2020, Kursk, Russia*. Kursk: Southwest State University; 2020. pp. 119–122. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Бекетов Сальбек Мустафаевич, аналитик, лаборатория «Цифровое моделирование индустриальных систем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: salbek.beketov@spbpu.com
ORCID: [0009-0009-6448-9486](https://orcid.org/0009-0009-6448-9486)

Salbek M. Beketov, analyst, Laboratory of Digital modeling of Industrial systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation.

Зубкова Дарья Андреевна, младший научный сотрудник, лаборатория «Цифровое моделирование индустриальных систем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: daria.zubkova@spbpu.com
ORCID: [0000-0003-1106-5080](https://orcid.org/0000-0003-1106-5080)

Daria A. Zubkova, junior researcher, Laboratory of Digital modeling of Industrial systems, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation.

Редько Сергей Георгиевич, доктор технических наук, директор, профессор, Высшая школа проектной деятельности и инноваций в промышленности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.
e-mail: redko_sg@spbstu.ru
ORCID: [0000-0002-4343-4154](https://orcid.org/0000-0002-4343-4154)

Sergey G. Redko, Doctor of Technical Sciences, Director, Professor, Higher School of Design and Innovation in Industry, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена после рецензирования 27.09.2024;
принята к публикации 30.10.2024.*

*The article was submitted 17.09.2024; approved after reviewing 27.09.2024;
accepted for publication 30.10.2024.*