

УДК 656.27

Перераспределение транспортных потоков между железнодорожными линиями различных категорий: постановка задачи и генетические алгоритмы

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Ковалев К. Е., Новичихин А. В. Перераспределение транспортных потоков между железнодорожными линиями различных категорий: постановка задачи и генетические алгоритмы // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 856–865. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-856-865

Аннотация

Цель: повысить эффективность функционирования железнодорожной транспортной сети с использованием провозной способности транзитных малоинтенсивных железнодорожных линий. **Методы:** применены методы теории управления, теория транспортных процессов, системного анализа, синтеза и генетических алгоритмов. **Результаты:** усовершенствован инструментарий перераспределения транспортных потоков между малоинтенсивными линиями и линиями других категорий с использованием генетических алгоритмов. **Практическая значимость:** предлагаемый инструментарий позволяет определить приоритет пропуска грузовых поездов между железнодорожными линиями различных категорий, включая малоинтенсивные, для снижения задержек в продвижении грузопотоков.

Ключевые слова: малоинтенсивные железнодорожные линии, генетические алгоритмы, транспортная сеть, логистика, перераспределение транспортных потоков

Введение

На железнодорожной транспортной сети особое место занимает проблема задержки в продвижении транспортных потоков по различным причинам, в связи с чем их перераспределение между железнодорожными линиями различных категорий, включая малоинтенсивные линии (МИЛ), является актуальным. Это позволяет повысить эффективность функционирования железнодорожной транспортной сети [1–3], способствует повышению пропускной и провозной способности, увеличению экономической эффективности за счет роста доходов от перевозок по МИЛ, повышению класса и категории линии.

Малоинтенсивные линии обслуживают, как правило, отдаленные регионы с низкой транспортной доступностью. Увеличение на них транспортного потока может способствовать экономическому развитию регионов, улучшая доступность и привлекая инвестиции [4–6].

Перераспределение потоков позволяет эффективно регулировать загруженность железнодорожной транспортной сети в интеграции с другими видами транспорта, совершенствуя логистический процесс доставки грузов. Необходимость перераспределения транспортных потоков между МИЛ и линиями других категорий в условиях высокой неравномерности

грузопотоков и загруженности отдельных направлений при низкой загруженности прилегающих параллельных линий обусловлена стремлением к оптимизации перевозочного процесса.

Постановка задачи перераспределения транспортных потоков между МИЛ и линиями других категорий

Пусть $L = L_1, L_2, \dots, L_n$ — множество железнодорожных линий, где L_i — i -я линия. $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ — множество поездов, где P_j — j -й поезд. Требуется организовать продвижение транспортного потока с использованием имеющейся инфраструктуры МИЛ.

При этом $x_{ij}(t)$ — бинарная переменная, равная 1, если поезд P_j находится на линии в момент времени t , и 0 в противном случае; d_{ij} — время движения поезда P_j по линии L_i ; c_i — пропускная способность линии L_i (максимальное количество поездов, которое может находиться на линии в единицу времени); ω_j — приоритет поезда P_j ; $s_i(t)$ — состояние линии L_i в момент времени t .

Целевая функция состоит в минимизации суммарного времени задержек продвижения грузопотоков и оптимальном продвижении транспортных потоков:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (d_{ij} \cdot x_{ij}(t) \cdot (1 - \frac{\omega_j}{W})), \quad (1)$$

где W — суммарный приоритет всех поездов;

n — количество поездов;

m — количество линий или маршрутов;

d_{ij} — задержка поезда i на линии j ;

x_{ij} — бинарная переменная;

w_j — приоритет поезда j ;

W — суммарный приоритет всех поездов,

то есть $W = \sum_{j=1}^m w_j$.

В выражении (1) d_{ij} представляет собой величину задержки поезда i на линии j . Бинарная переменная $x_{ij}(t)$ характеризует, находится ли поезд i на линии j в момент времени t : если поезд i находится на линии j в это время, переменная принимает значение 1, если нет — 0.

Для минимизации целевой функции задержки всех категорий поездов, особенно для составов с более высоким приоритетом, характеризуются формулой $1 - \frac{\omega_j}{W}$, в которой

$\frac{\omega_j}{W}$ представляет долю приоритета поезда j от суммарного приоритета всех поездов W , позволяющего уменьшить влияние задержки для поездов с более высоким приоритетом.

Пропускная способность каждой линии не превышает $\sum_{j=1}^m x_{ij}(t) \leq c_i, \forall i, t$. Поезд движется только по одной линии в каждый момент времени $\sum_{i=1}^n x_{ij}(t) \leq 1, \forall j, t$, которая представлена в виде бинарной неопределенности. Взаимодействие МИЛ и линий других категорий осуществляется при невозможности пропуска по другим линиям: $x_{ij}(t) \cdot s_i(t) \leq k, \forall i, j, t$, где k — коэффициент, определяющий допустимую нагрузку на линию.

Предложено решение этой задачи с использованием метода генетических алгоритмов оптимизации и поиска оптимального решения [7, 8].

Блок-схема процедуры перераспределения транспортных потоков на железнодорожной транспортной сети представлена на рис. 1. Предлагаемая блок-схема может быть интегрирована с действующими автоматизированными системами суточного клиентского плана погрузки (СКПП) или динамической моделью загрузки инфраструктуры (ДМЗИ). Предлагаемая структура использования генетического алгоритма для оптимизации управления железнодорожными линиями позволяет

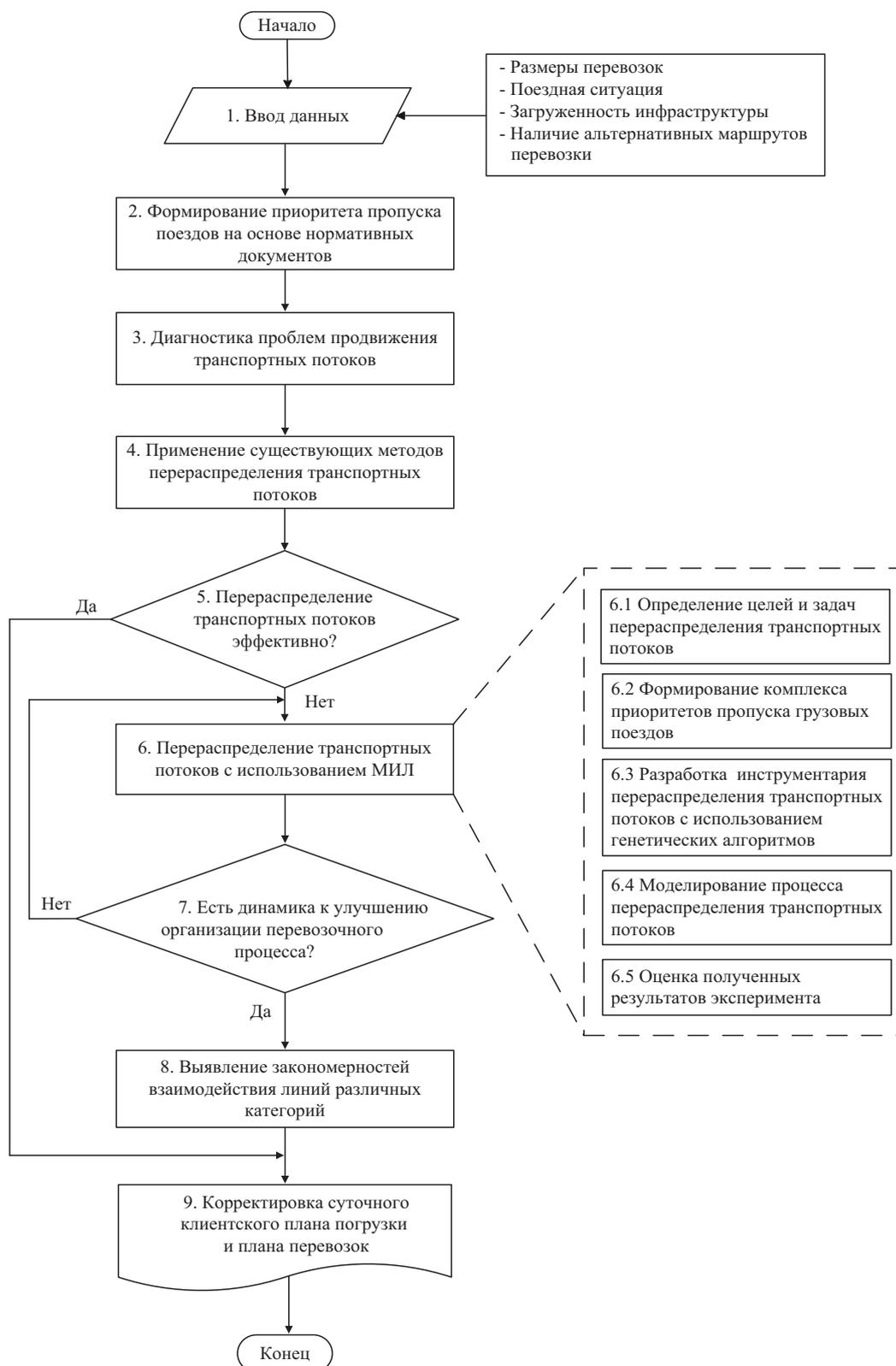


Рис. 1. Блок-схема процедуры перераспределения транспортных потоков на железнодорожной транспортной сети

снизить время задержки продвижения грузопотока.

На первом этапе реализуется ввод данных о размерах перевозок, поездной ситуации, загрузженности инфраструктуры и наличии альтернативных маршрутов перевозок. Далее формируется приоритетность пропуска поездов в соответствии с нормативными документами, и диагностируются проблемы в продвижении грузопотоков. После этого применяются существующие методы перераспределения транспортных потоков, включая изменение плана формирования поездов и оперативные приказы по перевозкам кружностью (44 %) и объединению назначения (56 %). Если существующие методы эффективны, то на их основе формируется мониторинг перевозочного процесса. Если неэффективны, то реализуется перераспределение транспортных потоков с использованием МИЛ, которое включает в себя определение целей и задач, формирование комплекса приоритетов пропуска грузовых поездов, разработку инструментария для их реализации с использованием генетических алгоритмов, моделирование и оценку полученных результатов.

Имеется набор грузовых поездов различных категорий, отправляемых в одном направлении с возможностью использования альтернативных маршрутов. Осуществляется отбор приоритета пропуска поездов в соответствии с нормативными документами [9]. В случае затруднений в продвижении грузопотоков, высокой загрузженности отдельных линий с учетом внешних возмущающих воздействий формируются новое решение и план перераспределения транспортных потоков. При положительной динамике в организации перевозочного процесса реализуется предлагаемый план.

Приоритетность пропуска поездов в модели разработана в соответствии с [9] в за-

висимости от следующей очередности перевозок:

- 1) восстановительные и пожарные поезда;
- 2) высокоскоростные, скоростные, скорые пассажирские поезда в дальнем следовании;
- 3) пригородное сообщение;
- 4) почтово-багажные, грузобагажные поезда;
- 5) специальные поезда;
- 6) грузо-пассажирские и людские поезда;
- 7) грузовые поезда (сквозные, участковые, сборные, вывозные, передаточные), хозяйственные поезда и локомотивы без вагонов.

Реализация перераспределения транспортных потоков между МИЛ и линиями других категорий

Решение рассмотрим на примере (рис. 2). Пусть имеется железнодорожная станция, к которой в одном направлении примыкают линии L_1 , пропускная способность которой составляет $c_1 = 36$ пар поездов в сутки, и L_2 (МИЛ), пропускная способность — $c_2 = 8$ пар поездов в сутки.

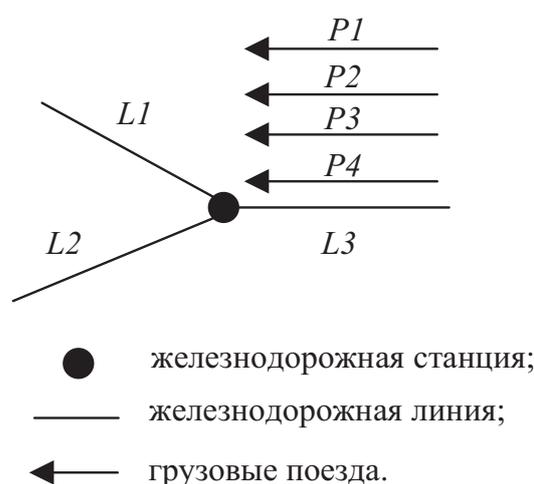


Рис. 2. Задача гибкого перераспределения транспортного потока между железнодорожными линиями различных категорий

Имеется необходимость в перераспределении транспортных потоков грузовых поездов следующих видов: участковый поезд P_1 ; передаточный поезд P_2 ; сквозной поезд P_3 ; вывозной поезд P_4 . Приоритет пропуска поездов в соответствии с [9] составит: для P_1 — $\omega_1 = 1$; для P_2 — $\omega_2 = 2$; для P_3 — $\omega_3 = 3$; для P_4 — $\omega_4 = 4$. Время движения по линиям в минутах составит: $d_{1,1} = 45$; $d_{1,2} = 53$; $d_{1,3} = 63$; $d_{1,4} = 84$; $d_{2,1} = 55$; $d_{2,2} = 66$; $d_{2,3} = 78$; $d_{2,4} = 106$.

Целевая функция в соответствии с выражением (1) имеет вид:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (d_{ij} \cdot x_{ij}(t) \cdot (1 - \frac{\omega_j}{10})).$$

Разработан программный код на языке Python, для проведения модельных экспериментов фрагмент кода представлен на рис. 3.

Проведен комплекс модельных экспериментов и представлены наиболее значимые результаты моделирования (табл. 1). Вариант 1 характеризует существующий перевозочный процесс без перераспределения транспортных потоков с приоритетом вывозных поездов. Ва-

риант 2 — умеренный вариант, включающий изменение в перераспределении транспортных потоков и повышение приоритета передаточным и сквозным поездам. Вариант 3 характеризует рациональное перераспределение с приоритетом для участковых и вывозных поездов. Вариант 4 — перераспределение на МИЛ с приоритетом для передаточных поездов.

Показатель «фитнес-функция» характеризует эффективность принимаемого решения по распределению грузовых поездов по линиям L_1, L_2 и позволяет ранжировать решения по их качеству. Решения с максимальным значением фитнес-функции определяют направление поиска оптимального решения на качественном уровне. При этом вариант 1 (без распределения) имеет наименьшее значение по этому показателю, что свидетельствует о необходимости поиска вариантов перераспределения транспортных потоков.

Наименьшее значение меры устойчивости — в варианте 1, остальные варианты имеют большую степень устойчивости. Лучшие

```

37 ▾         for j in range(num_trains):
38 ▾             if individual[i, j] == 1:
39 ▾                 fitness += times[i, j] * (1 - priorities[j] / 6)
40 ▾         return fitness
41
42 ▾ def selection(population):
43 ▾     selected = []
44 ▾     for _ in range(pop_size):
45 ▾         i, j = random.sample(range(pop_size), 2)
46 ▾         if fitness_function(population[i]) < fitness_function(population[j]):
47 ▾             selected.append(population[i])
48 ▾         else:
49 ▾             selected.append(population[j])
50 ▾     return selected
51
52 ▾ def crossover(parent1, parent2):
53 ▾     if random.random() < crossover_rate:
54 ▾         point = random.randint(1, num_trains - 1)
55 ▾         child1 = np.concatenate((parent1[:, :point], parent2[:, point:]), axis=1)
56 ▾         child2 = np.concatenate((parent2[:, :point], parent1[:, point:]), axis=1)
57 ▾         return child1, child2
58 ▾     return parent1, parent2

```

Рис. 3. Фрагмент программного кода на языке Python

ТАБЛИЦА 1. Результаты моделирования

Показатели	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Приоритет поездов	1, 2, 3, 4	1, 2, 2, 1	4, 3, 2, 4	1, 2, 1, 1
Лучшее решение	[1, 1, 1, 1] [0, 0, 0, 0]	[1, 1, 0, 1] [0, 0, 1, 0]	[1, 0, 1, 1] [0, 1, 0, 0]	[1, 0, 0, 1] [0, 1, 1, 0]
Степень эффективности (фитнес-функция)	13,72	184,83	187,46	195,3
Мера устойчивости к внешним возмущающим воздействиям (мутация)	0,38	0,59	0,59	0,59
Степень вариантности принимаемого решения (кроссовер)	0,98	1,0	1,0	1,0

значения степени вариантности принимаемого решения — у вариантов 2–4.

В варианте 1 (без перераспределения транспортных потоков) поезда следуют по линии L_1 , это характеризует лучшее решение [1, 1, 1, 1]. В варианте 2 (частичное перераспределение на малоинтенсивные линии) возможен пропуск сквозного грузового поезда по линии L_2 . В варианте 3 реализован пропуск передаточного грузового поезда по линии L_2 . В варианте 4 — пропуск передаточного и сквозного грузового поезда по линии L_2 .

В результате моделирования установлено, что возможно перераспределение грузовых поездов между МИЛ и линиями других категорий для передаточных и сквозных грузовых поездов.

По представленным вариантам разработаны графики значения функции приспособленности по поколениям (рис. 4) и гистограммы распределения загрузки линий (рис. 5).

График функции приспособленности по поколениям характеризует значения процесса поиска оптимального решения с использованием генетического алгоритма.

Вариант 1. Тенденция минимального значения фитнес-функции характеризует улучшение процесса поиска оптимального реше-

ния при проводимом эксперименте. Среднее значение фитнес-функции имеет нисходящий тренд, что свидетельствует о диверсификации получаемых результатов. Максимальное значение фитнес-функции имеет скачкообразный вид, свидетельствующий о возможности нахождения новых, оптимальных решений, при этом алгоритм успешно поддерживает вариативность принимаемых решений.

Вариант 2. Минимальное значение функции имеет тенденцию к снижению, что указывает на улучшение общего качества принимаемого решения. Среднее значение плавно снижается. Максимальное значение функции плавно снижается, что уменьшает возможность нахождения новых вариантов перераспределения транспортных потоков.

Вариант 3. Минимальное значение функции имеет тенденцию к снижению. Среднее значение фитнес-функции плавно снижается и приближается к минимальному значению вариантности маршрутов. Максимальное значение функции имеет скачкообразный вид, что характеризует поиск оптимальных вариантов перераспределения транспортных потоков.

Вариант 4. Минимальное значение функции на начальном этапе имеет самое высокое значение в рассматриваемых вариантах

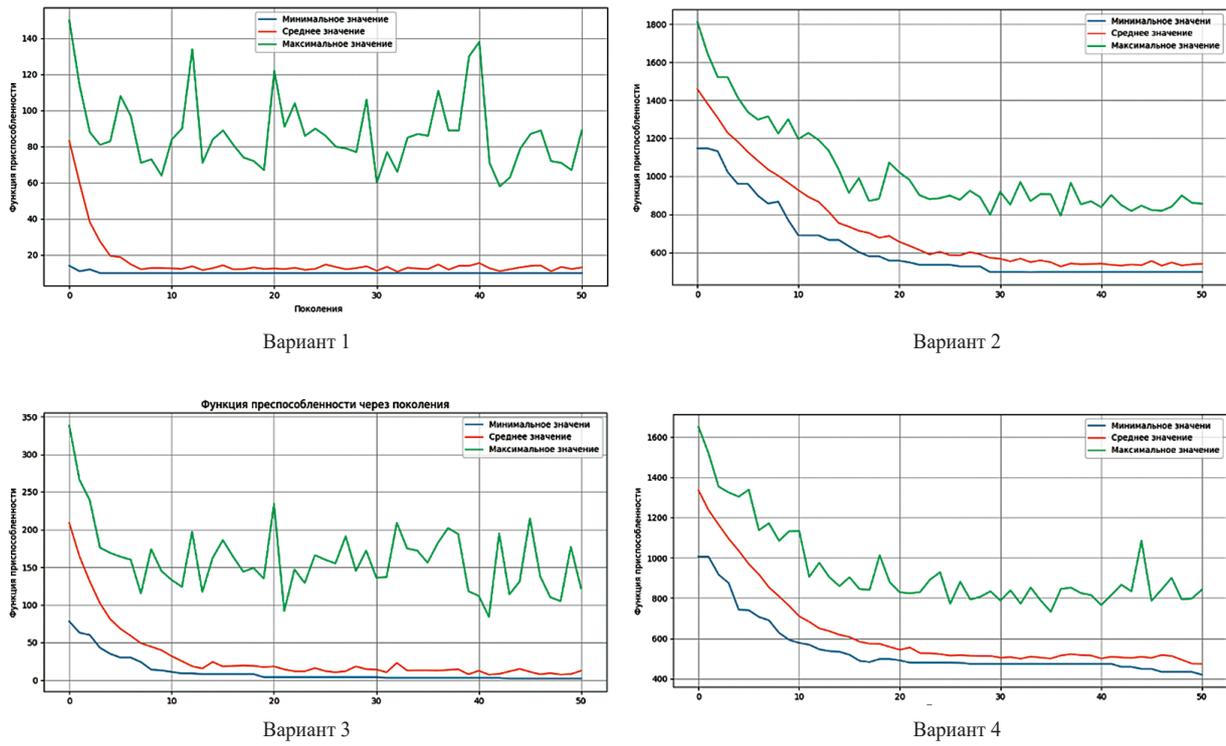


Рис. 4. Функции приспособленности по поколениям

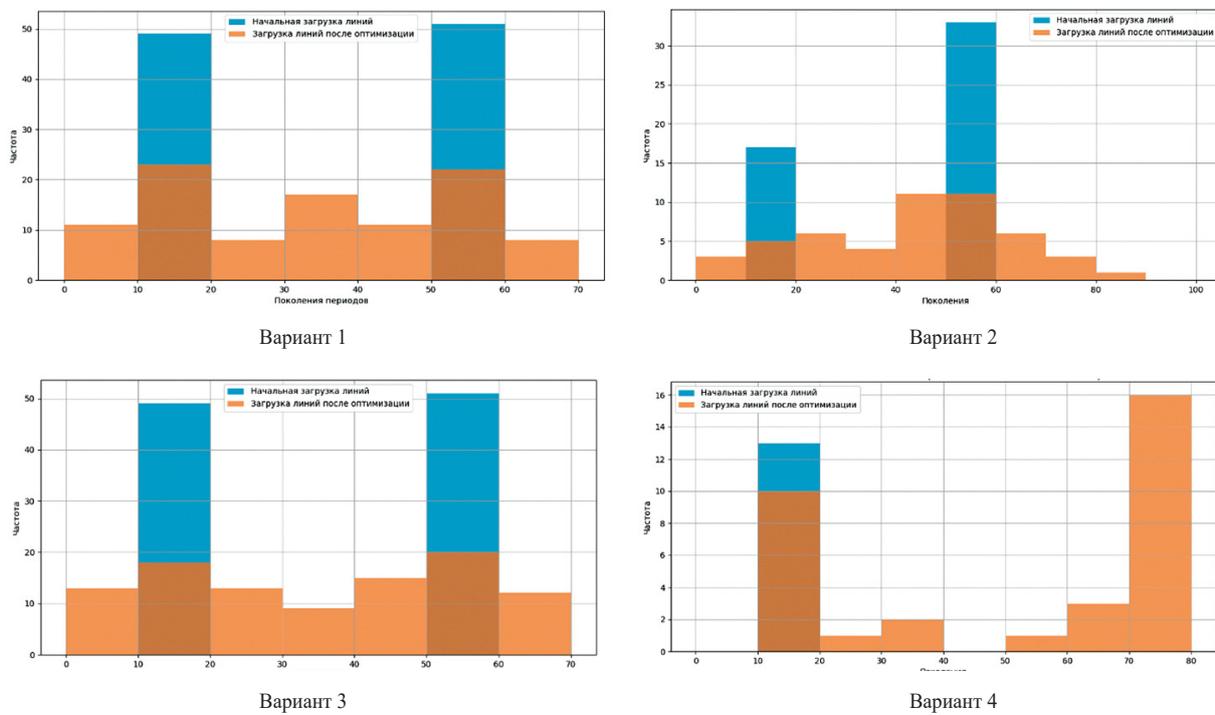


Рис. 5. Гистограммы распределения загрузки линий

и имеет тенденцию к снижению. Среднее значение функции плавно снижается и приближается к минимальному значению вариантности маршрутов. Максимальное значение функции имеет незначительные колебания для вариантности перераспределения транспортных потоков.

Гистограммы распределения характеризуют начальные и оптимизированные значения загрузки линий, определенные с использованием генетического алгоритма, что показывает эффективность применяемого инструментария по оптимизации распределения транспортных потоков между железнодорожными линиями различных категорий.

Вариант 1 имеет высокую загруженность отдельных линий на различных этапах моделирования. Вариант 2 при наличии альтернативных маршрутов снижает частоту загрузки линий с 50 до 35. Вариант 3 имеет равномерную загруженность линий при высокой начальной загруженности отдельных направлений. Вариант 4 характеризует высокую степень перераспределения транспортных потоков и высокую степень загруженности на последних тактах моделирования.

Анализ полученных результатов моделирования позволяет лицу, принимающему решения, иметь полную информацию о возможных вариантах перераспределения транспортных потоков с использованием инфраструктуры МИЛ.

В результате анализа проведенного комплекса экспериментов выявлен ряд закономерностей:

1. Перераспределение грузовых поездов целесообразно применять для минимизации задержек в продвижении грузопотоков, которые трудно учесть при планировании перевозочного процесса.

2. Транзитные МИЛ могут быть использованы для продвижения грузопотоков, имеющих

запас по сроку доставки груза, с предоставлением системы скидок клиентам, что позволит повысить эффективность использования пропускной способности транспортной сети.

3. Снизить критические, максимальные значения потребной пропускной способности для отдельных линий возможно за счет использования транзитных МИЛ.

4. Адаптивность железнодорожной транспортной системы к высокой неравномерности транспортных потоков позволяет перераспределять их в зависимости от внешних и внутренних возмущающих воздействий, к которым относятся задержки в продвижении грузопотоков, нестандартные ситуации и изменение спроса на перевозки.

Заключение

Рассмотрена задача перераспределения транспортных потоков между железнодорожными линиями различных категорий с применением генетических алгоритмов для эффективного использования существующей железнодорожной инфраструктуры.

Применение генетических алгоритмов позволяет улучшить распределение грузовых поездов по линиям за счет оптимизации целевой функции, учитывающей приоритеты поездов и пропускную способность железнодорожных линий. Представлена программная реализация на языке Python и графическая интерпретация модельных экспериментов.

В модели учитываются приоритеты грузовых поездов на основании действующих нормативных документов, что позволяет минимизировать задержки для составов, имеющих высокий приоритет. Предложенное решение задачи применимо в реальных условиях для перераспределения транспортных потоков при наличии альтернативных маршрутов продвижения груза по МИЛ и линиям других категорий.

Библиографический список

1. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий: монография / С. П. Вакуленко [и др.]; под ред. С. П. Вакуленко. М.: ВИНТИ РАН, 2018. 218 с.

2. Шарапов С. Н., Лялько М. В. Классификация и специализация железнодорожных линий — основа оптимизации эксплуатационных расходов // Железнодорожный транспорт. 2016. № 7. С. 50–60.

3. Ковалев К. Е., Новичихин А. В., Медведь О. А. Разработка механизмов повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8. № 2. С. 150–161. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161

4. Ковалев К. Е., Новичихин А. В. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодетальных линиях // Автоматика на транспорте. 2021. Т. 7. № 2. С. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267

5. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Т. 402 LNNS. С. 701–709. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_76

6. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (ИТММ 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. 2021. P. 032008. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008

7. Evolutionary Computation: The Fossil Record / ed. D. B. Fogel. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998.

8. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.

9. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250. М.: ИНФРА-М, 2022. 561 с.

Дата поступления: 04.10.2024

Решение о публикации: 08.11.2024

Контактная информация:

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук; kovalev@pgups.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — докт. техн. наук, доцент; novichihin@bk.ru

Redistribution of traffic flows between railway lines of different categories: problem statement and genetic algorithms

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

For citation: Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Redistribution of traffic flows between railway lines of different categories: problem statement and genetic algorithms // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 856–865. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-856-865

Abstract

Purpose: to improve the efficiency of the railway transport network using the carrying capacity of low-intensity transit railway lines. **Methods:** methods of control theory, transport process theory, system

analysis, synthesis and genetic algorithms were applied. Results: The toolkit for redistributing traffic flows between low-intensity lines and lines of other categories using genetic algorithms was improved. **Practical significance:** the proposed toolkit allows determining the priority of passing freight trains between railway lines of different categories, including low-intensity ones, in order to reduce delays in the movement of freight flows.

Keywords: low-intensity railway lines, genetic algorithms, transport network, logistics, redistribution of traffic flows

References

1. Effektivnost' ekspluatatsii i obsluzhivaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy: monografiya / S. P. Vakulenko [i dr.]; pod red. S. P. Vakulenko. M.: VINITI RAN, 2018. 218 s. (In Russian)
2. Sharapov S. N., Lyal'ko M. V. Klassifikatsiya i spetsializatsiya zheleznodorozhnykh liniy — osnova optimizatsii ekspluatatsionnykh raskhodov // Zheleznodorozhnyy transport. 2016. No. 7. S. 50–60. (In Russian)
3. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Medved' O. A. Razrabotka mekhanizmov povysheniya effektivnosti funkcionirovaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy // Avtomatika na transporte. 2022. T. 8. No. 2. S. 150–161. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161 (In Russian)
4. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podhod k upravleniyu processami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyah // Avtomatika na transporte. 2021. T. 7. No. 2. S. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267 (In Russian)
5. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. T. 402 LNNS. S. 701–709. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_76
6. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. 2021. P. 032008. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008
7. Evolutionary Computation: The Fossil Record / ed. D. B. Fogel. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998.
8. Emel'yanov V. V., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. Teoriya i praktika evolyucionnogo modelirovaniya. M.: Fizmatlit, 2003. 432 s. (In Russian)
9. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossijskoj Federatsii: utv. prikazom Mintransa Rossii ot 23.06.2022 No. 250. M.: INFRA-M, 2022. 561 s. (In Russian)

Received: 04.10.2024

Accepted: 08.11.2024

Author's information:

Konstantin E. KOVALEV – PhD in Engineering;
kovalev@pgups.ru

Alexey V. NOVICHIKHIN – Dr. Sci. in Engineering,
Associate Professor; novichikhin@bk.ru