

УДК 656.27

Модель задачи функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий на различных этапах жизненного цикла их работы

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин

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

Для цитирования: Ковалев К. Е., Новичихин А. В. Модель функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий на различных этапах жизненного цикла их работы // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 308–315. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-308-315

Аннотация

Цель: Повышение эффективности функционирования железнодорожной транспортной сети за счет разработки инструмента, позволяющего осуществлять выбор между вариантами функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий. **Методы:** Применены методы теории управления, теории транспортных процессов, системного анализа и динамического программирования. **Результаты:** Разработаны инструментарий интегральной оценки эффективности малоинтенсивных железнодорожных линий на различные горизонты планирования. **Практическая значимость:** Предлагаемый инструментарий позволяет осуществлять прогноз альтернативных этапов жизненного цикла эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе интегрального набора технических, технологических и экономических показателей.

Ключевые слова: Малоинтенсивные железнодорожные линии, динамическое программирование, транспортная сеть, показатели работы транспорта.

Введение

Малоинтенсивные железнодорожные линии (МИЛ) являются сложным объектом управления в железнодорожной транспортной системе [1, 2]. Экономические факторы, вызывающие изменение спроса на перевозки [3, 4], необходимость технического переоснащения и оптимизации перевозочного процесса требуют применения методов, которые позволяют формировать и оценивать различные варианты функционирования таких линий. Для МИЛ выделены четыре основных этапа жизненного цикла эксплуатации, которые включают в себя: поиск новой грузовой базы; модернизацию; временную консервацию; демонтаж.

«Поиск новой грузовой базы» реализуется с учетом существующих и перспективных мощностей предприятий, привлечения новых клиентов, а также за счет оказания транспортно-логистических, терминально-складских и экспедиторских услуг.

«Модернизация» включает в себя изменение технологии эксплуатации работы МИЛ (режим работы линии и станций), совмещение професий работников на линии, изменение технологии обслуживания станций и линий в зависимости от размеров перевозок, технологическое переоснащение систем управления движением поездов на участке в целях упрощения и снижения затрат на их эксплуатацию.

«Временная консервация» включает закрытие железнодорожных линий для движения поездов. Для закрытия железнодорожных путей общего пользования, в том числе МИЛ, владелец инфраструктуры опрашивает в Министерство транспорта Российской Федерации письменное предложение о закрытии железнодорожных путей с указанием: сведений о владельце инфраструктуры; адреса; государственного регистрационного номера записи о государственной регистрации юридического лица. К предложению в произвольной форме прилагаются: технико-экономическое обоснование закрытия железнодорожных путей; предложение субъекта Российской Федерации по вопросу закрытия железнодорожных путей; данные об объемах и характере грузовой и пассажирской работы; сведения о технической характеристике и точном местонахождении железнодорожных путей, подлежащих закрытию; схема железнодорожных путей, подлежащих закрытию; информация о наличии пассажирского движения поездов, а также грузоотправителей и грузополучателей, осуществляющих грузовые операции с использованием железнодорожных путей, подлежащих закрытию; сведения о предполагаемых изменениях в технологии обслуживания пассажиров, грузоотправителей и грузополучателей при закрытии железнодорожных путей, включая расчет возможного изменения тарифной нагрузки в случае переноса операций на другие железнодорожные пути и оценку возможности их обслуживания другими видами транспорта на соответствующем направлении; расчет затрат на проведение мероприятий по закрытию железнодорожных путей [5].

«Демонтажу» подлежат МИЛ, которые длительное время находятся в консервации и не подлежат восстановлению для организации движения в связи с отсутствием спроса на пассажирские и грузовые перевозки.

При этом отсутствуют инструменты классификации и отнесения МИЛ к какому-то из вариантов

функционирования и возможности перехода из одного варианта к другому. А также отсутствует возможность прогноза на краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный горизонт планирования по существующим вариантам функционирования МИЛ. В зависимости от горизонтов планирования выделяют долгосрочное, среднесрочное и краткосрочное планирование работы МИЛ.

Долгосрочное планирование работы МИЛ формирует стратегические перспективы работы линии и плановые показатели финансового результата линии, инфраструктурную модернизацию в соответствии с потребностями в перевозках [6–8]; определяет возможность развития логистических узлов и терминалов; рассматривает оптимизацию маршрутов и грузопотоков с интеграцией в крупные международные транспортные коридоры. Разрабатывает инструменты привлечения крупных грузоотправителей на полигоне МИЛ с учетом динамики изменений грузопотоков.

Среднесрочное планирование работы МИЛ состоит в повышении экономической эффективности и эксплуатационной надежности путем снижения затрат на эксплуатацию и обслуживание линий, оптимизации режима работы линии, а также привлечения новой грузовой базы.

Краткосрочное планирование работы МИЛ состоит в решении текущих задач эксплуатации и обеспечения стабильной работы, включающих проведение регламентных работ по поддержанию инфраструктуры, оптимизацию существующей технологии перевозочного процесса, реализуемой на участке. Поиск инструментов экономически эффективного перераспределения грузопотоков с интенсивных направлений линий на МИЛ. Анализ статей доходов и расходов линии. Подготовка линии к работе в зимних условиях эксплуатации.

Краткосрочное планирование МИЛ состоит в поддержании работоспособности линии. Среднесрочное планирование является платформой

для достижения долгосрочной стратегии. Долгосрочная стратегия обеспечивает траекторию стабильной эксплуатации МИЛ для увеличения срока активной эксплуатации такой линии.

Таким образом, требуется разработка модели определения этапов жизненного цикла эксплуатации и возможного перехода между ними на основе набора технических, технологических и экономических аспектов эксплуатации линий с учетом временной динамики. В статье приводятся математическая постановка задачи, инструменты ее решения и результаты модельных экспериментов оценки интегрального показателя эффективности МИЛ для различных горизонтов планирования.

1. Постановка задачи определения интегрального показателя эффективности для этапов жизненного цикла эксплуатации МИЛ

На полигоне железной дороги имеются x МИЛ, требуется повысить эффективность функционирования таких линий на основе совокупности технических, технологических и экономических показателей.

Пусть дано $s_i^x(t) \in \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ — состояния железнодорожной линии в момент времени t , где S_1 — линия находится в режиме поиска грузовой базы; S_2 — линия модернизируется и функционирует; S_3 — линия законсервирована; S_4 — линия демонтирована.

При этом $a_i \in \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ — действия, принимаемые в момент времени t , где A_1 — перейти к поиску грузовой базы; A_2 — провести модернизацию; A_3 — законсервировать линию; A_4 — демонтировать линию.

Требуется по набору технических, технологических и экономических показателей определить эффективность функционирования МИЛ при выборе альтернативных этапов жизненного цикла эксплуатации таких линий с учетом вре-

менной динамики, учитывающей эффективность реализуемых мероприятий. Решение задачи выполняется поэтапно.

Этап 1. Интегральный показатель эффективности характеризуется набором показателей надежности железнодорожной инфраструктуры, грузонапряженностью и финансовым результатом. Функция $\pi = \{a_1, a_2, \dots, a_t\}$ задает выбор действий a_i в каждый момент времени t (принимаемый равным шагом в один месяц) исходя из текущего состояния s_t .

Для этого вводим интегральный показатель эффективности $E(s_t, a_t)$, который отражает эффективность определенного действия a_t , выполненного в состоянии s_t с учетом трех ключевых компонентов: коэффициента надежности железнодорожной инфраструктуры ($T_{\text{тех}}$); технологической эффективности МИЛ (грузонапряженность не более 5 млн т-км брутто/км ($T_{\text{техн}}$); финансового результата, млн руб./год ($T_{\text{экон}}$).

Интегральный показатель рассчитывается как взвешенная сумма элементов:

$$E(s_t, a_t) = w_{\text{тех}} T_{\text{тех}} + w_{\text{техн}} T_{\text{техн}} + w_{\text{экон}} T_{\text{экон}}, \quad (1)$$

где $w_{\text{техн}}$, $w_{\text{тех}}$, $w_{\text{экон}}$ — весовые коэффициенты, определяемые в относительных единицах, отражающие относительную значимость каждого из компонентов по мультипликативной свертке взаимозависимых переменных.

Для сценария поиска грузовой базы значения компонентов определяются по 10-балльной шкале. Инфраструктура находится в хорошем состоянии, отказы технических средств и неисправности происходят редко ($T_{\text{тех}} = 8$); грузонапряженность низкая из-за недостаточной грузовой базы ($T_{\text{техн}} = 4$); финансовый результат низкий из-за недостаточной грузовой базы ($T_{\text{экон}} = 4$).

Весовые коэффициенты определены экспертной оценкой со следующими значениями $w_{\text{тех}} = 0,3$; $w_{\text{техн}} = 0,3$; $w_{\text{экон}} = 0,4$, таким обра-

зом, $E(s_t, a_t) = 5,2$ для сценария поиска грузовой базы. Таблица эффективности для всех s_t и a_t строится аналогично, с учетом особенностей каждого состояния и действия (табл. 1).

Таблица 1. Интегральные показатели этапов жизненного цикла эксплуатации МИЛ

Варианты	Поиск грузовой базы	Модернизация	Консервирование	Демонтаж
Поиск грузовой базы	5,2	4,3	2,4	1,4
Модернизация	4,3	4,1	2,3	1,3
Консервирование	2,4	2,3	2,1	1,2
Демонтаж	1,4	1,3	1,2	1,1

Значение ценности текущего состояния s_t на шаге t определяется как максимальная ожидаемая эффективность от выбора действия a_t , состоящая из текущей интегральной эффективности $E(s_t, a_t)$ и ожидаемой дисконтированной ценности будущих состояний, которая учитывает вероятность перехода в состояние s_{t+1} и его ценности в следующем периоде $V_{t+1}(s_{t+1})$ с использованием уравнения Беллмана [9]:

$$V_t(s_t) = \max_{a_t} [E(s_t, a_t) + \beta \sum_{t+1} P(s_{t+1} | s_t, a_t) V_{t+1}(s_{t+1}) + V_t(s_t)], \quad (1)$$

где $V_t(s_t)$ — максимальная ценность состояния s_t на шаге t ;

\max_{a_t} — поиск действия a_t , которое максимизирует значение в скобках;

$E(s_t, a_t)$ — интегральный показатель эффективности;

β — коэффициент дисконтирования $0 < \beta < 1$, отражающий снижение ценности будущих результатов по сравнению с текущими, выраженных в интегральном показателе;

$P(s_{t+1} | s_t, a_t)$ — вероятность перехода из состояния s_t в состояние s_{t+1} , если выбрано действие a_t ;

$V_{t+1}(s_{t+1})$ — оптимальная ценность состояния s_{t+1} в следующем периоде.

Выражение (1) позволяет определить последовательность действий a_t на каждом шаге времени t (принимая равным месяцу), которое максимизирует текущий интегральный показатель эффективности. При этом задан ряд ограничений:

1. Переход между этапами возможен только в один из альтернативных этапов.
2. Из этапа «демонтаж» нет перехода в альтернативные этапы.
3. Этап «модернизации» может быть реализован из «поиска грузовой базы» или «консервирования».
4. Начальное состояние известно s_1 .
5. Временной горизонт является конечным.

Для решения представленной задачи использован метод динамического программирования. Поиск оптимальной стратегии π состоит в инициализации функции эффективности $V(s_t) = E(s_t)$ для конечного момента времени T и итеративном определении значения $V(s_t)$ для всех состояний s_t , с использованием разработанной программы на языке программирования Python (библиотеки numpy для расчетов и matplotlib для построения графиков).

Этап 2. Определение вероятности перехода между этапами жизненного цикла:

$$P_{ij}(t) = P(s_{t+1} = j | s_t = i, a_t), \quad (3)$$

где $P_{ij}(t)$ — вероятность перехода из состояния i в состояние j в момент t ;

s_t — текущее состояние;

s_{t+1} — следующее состояние, позволяющее определить эффективность выбранного этапа жизненного цикла эксплуатации МИЛ.

Этап 3. Эффективность функционирования МИЛ определяется накоплением значений эффек-

тивности всех решений на выбранном горизонте планирования по выражению:

$$E_T = \sum_{t=0}^T \sum_{s \in S} \max_{a_t} [E(s_t, a_t) + \beta \sum_{s'} P(s' | s, a_t) V_{t+1}(s')]. \quad (4)$$

Этап 4. Модельные эксперименты и отбор решений. Построение графиков, отражающих динамическое значение интегрального показателя эффективности и вероятности перехода между этапами.

2. Определение интегрального показателя эффективности эксплуатации МИЛ на различные горизонты планирования

Решение задачи для определения интегрального показателя эффективности эксплуатации МИЛ на различные горизонты планирования на основе выражений (1) — (4) реализовано с помощью программы на языке программирования Python (библиотеки numpy для этапов 1–3 и matplotlib для этапа 4).

В качестве исходных данных был определен набор показателей для МИЛ: коэффициент надежности железнодорожной инфраструктуры; грузонапряженность; финансовый результат. Проведен комплекс модельных экспериментов для краткосрочного (12 месяцев), среднесрочного (до 5 лет) и долгосрочного планирования (30 лет) для условий полигона Октябрьской железной дороги, результаты моделирования представлены в табл. 2.

Для краткосрочного горизонта планирования наиболее эффективным этапом жизненного цикла эксплуатации МИЛ является «модернизация», что связано с высоким потенциалом линии и возможностью роста эффективности за счет небольших вложений в инфраструктуру. Вероятность перехода между сценариями отсутствует. Этапы

жизненного цикла эксплуатации МИЛ «консервация» или «демонтаж» на этом горизонте планирования показывают низкую эффективность. На краткосрочном горизонте планирования целесообразно осуществлять мероприятия по «привлечению грузовой базы» и «модернизации» линии.

Для среднесрочного горизонта планирования наиболее эффективным является «модернизация» технического оснащения МИЛ. На горизонте 2–3 лет появляется возможность перехода между «поиском грузовой базы» и «консервированием», но «поиск грузовой базы» имеет большее значение интегрального показателя эффективности по сравнению с «консервированием». «Консервирование» начинает показывать свою эффективность при уменьшении грузовой базы.

Для долгосрочного горизонта планирования «поиск грузовой базы» имеет наибольшее значение интегрального показателя эффективности. «Модернизация» начинает терять свою эффективность при низком спросе на перевозки и пересекается со сценарием «консервирования» на горизонте планирования 20–25 лет, что может быть учтено при разработке долгосрочной программы развития МИЛ. «Консервация» и «демонтаж» становятся обоснованными, когда спрос на транспортировку минимален, а «модернизация» неэффективна.

Заключение

Предложена модель задачи определения эффективности функционирования МИЛ на различных этапах жизненного цикла с применением динамического программирования на краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный горизонт планирования с учетом технических, технологических и экономических показателей работы МИЛ. Наиболее перспективным вариантом функционирования МИЛ является поиск новой грузовой базы, что повышает общий спрос на перевозки.

Таблица 2. Результаты моделирования

Горизонт планирования	Краткосрочный (12 месяцев)	Среднесрочный (5 лет)	Долгосрочный (30 лет)
Интегральный показатель эффективности			
Вероятность перехода между сценариями			
Эффективность инвентаризации МИЛ			

Результаты моделирования целесообразно использовать при разработке программ повышения эффективности эксплуатации МИЛ на различные горизонты планирования для развития железнодорожной транспортной системы и поддержания экономической активности в регионах.

Список источников

1. Вакуленко С. П. Эффективность эксплуатации и обслуживания малоинтенсивных железнодорожных линий: монография / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова, Д. Ю. Роменский и др.; под ред. С. П. Вакуленко. — М.: ВИНТИ РАН, 2018. — 218 с.
2. Шарапов С. Н. Классификация и специализация железнодорожных линий — основа оптимизации эксплуатационных расходов / С. Н. Шарапов, М. В. Лялько // Железнодорожный транспорт. — 2016. — № 7. — С. 50–60.
3. Числов О. Н. К вопросу моделирования инфраструктурно-технологического взаимодействия в транспортных узлах / О. Н. Числов, Е. Е. Мизгирева // Вестник транспорта Поволжья. — 2023. — № 3(99). — С. 86–91.
4. Тимухина Е. Н. Повышение экономической эффективности функционирования существующих систем железнодорожного транспорта за счет применения уточненного подхода к расчету перерабатывающей способности обслуживающих устройств / Е. Н. Тимухина, Н. В. Кашеева, В. С. Колокольников, А. А. Кошеев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 2(49). — С. 26–33.
5. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении порядка закрытия железнодорожных путей общего пользования, в том числе малоинтенсивных линий и участков» от 30 мая 2023 года № 198.
6. Осинцев Н. А. Концепция гибридной многокритериальной модели устойчивой цепи поставок / Н. А. Осинцев, А. Н. Рахмангулов, П. Н. Мишкuroв, С. Н. Корнилов и др. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 1(93). — С. 90–104.
7. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодетальных линиях / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 2. — С. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267.
8. Ковалев К. Е. Оценка рисков при эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 4(96). — С. 161–172.
9. Беллман Р. Динамическое программирование / Беллман Р.; пер. с англ. И. М. Андреевой и др.; под общ. ред. Н. Н. Воробьева. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960. — 400 с.

Дата поступления: 27.02.2025

Решение о публикации: 12.04.2025

Контактная информация:

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук; kovalev@pgups.ru
 НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук, доц.; novichihin@bk.ru

Modelling the Functioning of Low-Intensity Railway Lines at Different Phases of Their Life Cycle

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Modelling the Functioning of Low-Intensity Railway Lines at Different Phases of Their Life Cycle // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 308–315. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-308-315

Summary

Purpose: To improve the efficiency of the rail network by developing a tool to select between options for the operation of low-intensity rail lines. **Methods:** Methods of control theory, theory of transport processes, system analysis and dynamic programming were applied. **Results:** A toolkit has been developed for the integrated assessment of the efficiency of low-intensity railway lines for different planning horizons. **Practical significance:** The proposed toolkit allows the forecasting of alternative phases of the life cycle of low-intensity railway lines based on an integrated set of technical, technological and economic indicators.

Keywords: Low-intensity railway lines, dynamic programming, transport network, transport performance indicators.

References

1. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu., Romenskiy D. Yu. et al. *Effektivnost' ekspluatatsii i obsluzhivaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy: monografiya; pod red. S. P. Vakulenko* [Efficiency of operation and maintenance of low-intensity railway lines: monograph; edited by S. P. Vakulenko]. Moscow: VINITI RAN Publ., 2018, 218 p. (In Russian)
2. Sharapov S. N., Lyal'ko M. V. Klassifikatsiya i spetsializatsiya zheleznodorozhnykh liniy — osnova optimizatsii ekspluatatsionnykh raskhodov [Classification and specialization of railway lines — the basis for optimizing operating costs]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2016, Iss. 7, pp. 50–60. (In Russian)
3. Chislov O. N., Mizgireva E. E. K voprosu modelirovaniya infrastruktorno-tekhnologicheskogo vzaimodeystviya v transportnykh uzлах [On the issue of modeling infrastructure and technological interaction in transport hubs]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. 2023, Iss. 3(99), pp. 86–91. (In Russian)
4. Timukhina E. N., Kashcheeva N. V., Kolokol'nikov V. S., Koshcheev A. A. Povyshenie ekonomicheskoy effektivnosti funktsionirovaniya sushchestvuyushchikh sistem zheleznodorozhnogo transporta za schet primeneniya utochnennogo podkhoda k raschetu pererabatyvayushchey sposobnosti obsluzhivayushchikh ustroystv [Improving the economic efficiency of existing railway transport systems by applying a refined approach to calculating the processing capacity of service devices]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering]. 2019, Iss. 2(49), pp. 26–33. (In Russian)
5. *Prikaz Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii "Ob utverzhdenii poryadka zakrytiya zheleznodorozhnykh putey obshchego pol'zova-niya, v tom chisle malointensivnykh liniy i uchastkov" ot 30 maya 2023 goda № 198* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation "On approval of the procedure for closing public railways, including low-intensity lines and sections" dated May 30, 2023 № 198]. (In Russian)
6. Osintsev N. A., Rakhmangulov A. N., Mishkurov P. N., Kornilov S. N. et al. Kontseptsiya gibridnoy mnogokriterial'noy modeli ustoychivoy tsepi postavok [Concept of a hybrid multi-criteria model of a sustainable supply chain]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 1(93), pp. 90–104. (In Russian)
7. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podkhod k upravleniyu protsessami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyakh [Integrated synergetic-indicator approach to managing transportation processes on intensive and low-intensity lines]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2021, vol. 7, Iss. 2, pp. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267. (In Russian)
8. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Otsenka riskov pri ekspluatatsii malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy [Risk assessment in the operation of low-intensity railway lines]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 4(96), pp. 161–172. (In Russian)
9. Bellman R. *Dinamicheskoe programmirovaniye; per. s angl. I. M. Andreevoy i dr.; pod obshch. red. N. N. Vorob'eva* [Dynamic programming; trans. from English by I. M. Andreeva et al.; under the general editorship of N. N. Vorobyov]. Moscow: Izd-vo inostr. lit. Publ., 1960, 400 p. (In Russian)

Received: February 27, 2025

Accepted: April 12, 2025

Author's information:

Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering; kovallev_kostia@mail.ru,

Alexey V. NOVICHIKHIN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; novichihin@bk.ru