

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин

ОЦЕНКА РИСКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАЛОИНТЕНСИВНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ

Аннотация. Оценка риска эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий позволяет выявлять и существенно снижать потенциальные затруднения в их работе. В статье предложен инструмент оценки рисков мероприятий для повышения эффективности эксплуатации малоинтенсивных линий, включающий в себя механизм контроля показателей работы подобных линий. Предлагаемый механизм контроля показателей основан на наборе технических, технологических и экономических показателей, которые являются случайными величинами с заданными средними значениями и ковариационной матрицей, учитывающей корреляции между показателями и сезонной неравномерностью. Разработан комплекс вариантов эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий (МИЛ), учитывающий изменение показателей для выбора эффективных направлений при заданных начальных условиях. Представлены результаты моделирования оценки вероятности возникновения альтернативных вариантов с использованием метода Монте-Карло для вероятностного распределения рисков и их совокупного воздействия на показатели. Дана количественная и качественная оценка возможных вариантов эксплуатации МИЛ при изменении ее финансового результата.

Ключевые слова: управление процессами перевозки, малоинтенсивные линии, потребная пропускная способность, наличная пропускная способность, железнодорожный транспорт, оценка рисков.

Для цитирования: Ковалев, К. Е. Оценка рисков при эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4. – С. 161–172. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_161.

Введение

Одной из задач эксплуатации железнодорожного транспорта является повышение эффективности работы железнодорожных линий. Большинство исследований, например, [1–5], рассматривает ситуацию, когда потребная пропускная способность ($N_{потр}$) динамично растёт (t_1, t_2, t_3, t_4) и превышает наличную пропускную способность ($N_{налич}$) с увеличением продолжительности жизненного цикла линии. В таких ситуациях применяется поэтапный комплекс повышения наличной пропускной способности для удовлетворения потребностей в перевозках (рис. 1).

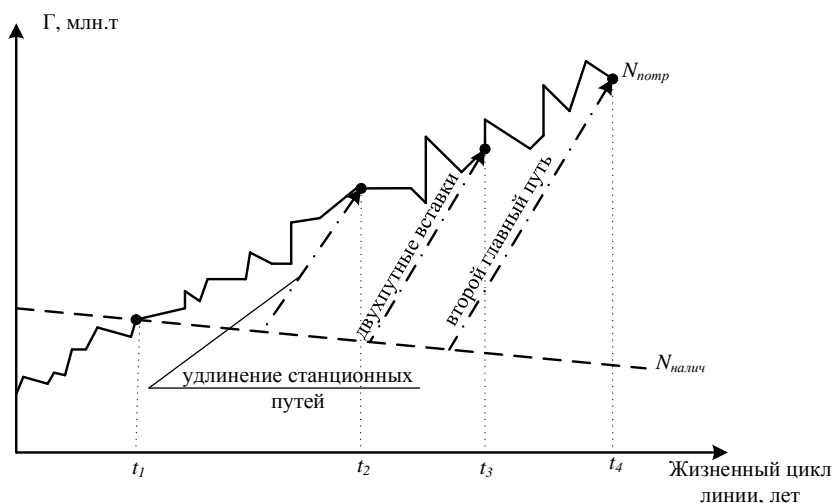


Рис. 1. Существующий подход к соотношению потребной и наличной пропускных способностей

Но имеется ряд ситуаций, когда потребная пропускная способность в течение жизненного цикла линии снижается по независящим от железнодорожного транспорта причинам (миграция населения, социальные и экономические преобразования, изменений структуры пассажиропотоков и грузопотоков), что приводит к появлению малоинтенсивных железнодорожных линий (МИЛ) (рис. 2) [6–8].

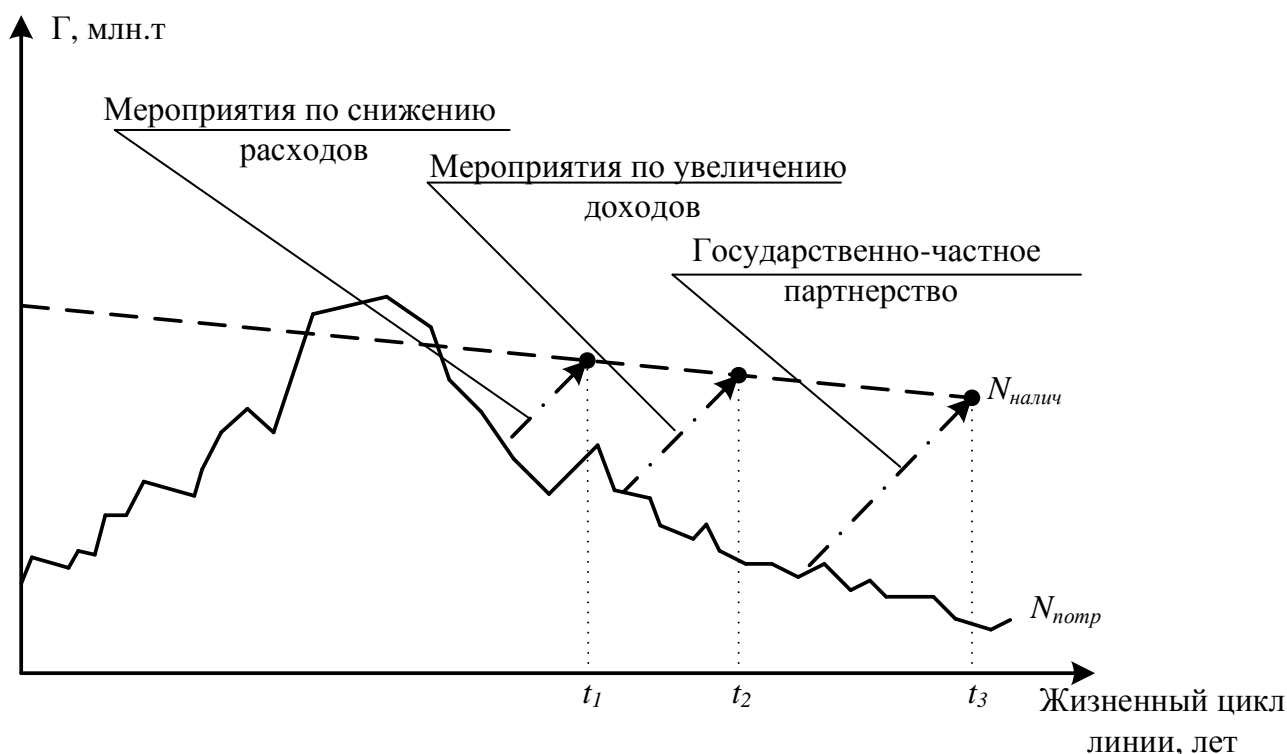


Рис. 2. Предлагаемый подход к соотношению потребной и наличной пропускных способностей на МИЛ

В этом случае разрабатывается ряд организационных мероприятий, направленных на снижение расходов, повышение доходов и государственно-частное партнёрство для улучшения рентабельности эксплуатации таких линий [9]. МИЛ являются элементом логистической транспортной системы, обеспечивая доступ к отдалённым районам и связывая их с более крупными транспортными узлами.

Для определения эффективности мероприятий по повышению эффективности эксплуатации МИЛ и принятия обоснованных управляющих решений необходима разработка инструмента контроля технических, технологических и экономических показателей с использованием оценки рисков для комплекса технических, технологических и экономических показателей.

Основная часть

Одним из ключевых аспектов повышения эффективности работы МИЛ является разработка и внедрение механизма контроля показателей, который системно, информационно и горизонтально интегрирован с механизмами смарт-диагностики [10] и планирования [11]. Предлагаемый механизм позволяет минимизировать потенциальные негативные последствия рисков и оптимизировать работу МИЛ по набору критериев за счет идентификации возможных рисков и их последствий при реализации мероприятий по повышению эффективности эксплуатации МИЛ.

Оценка рисков предоставляет возможность выявить и количественно оценить затруднения, связанные с различными аспектами работы железнодорожных линий, включая техническое состояние инфраструктуры, организацию перевозок и финансовую устойчивость. На основе этой информации разрабатываются корректирующие меры, направленные на снижение вероятности возникновения проблем и уменьшение их негативного воздействия. Процедура контроля показателей работы МИЛ представлена на рис. 3.

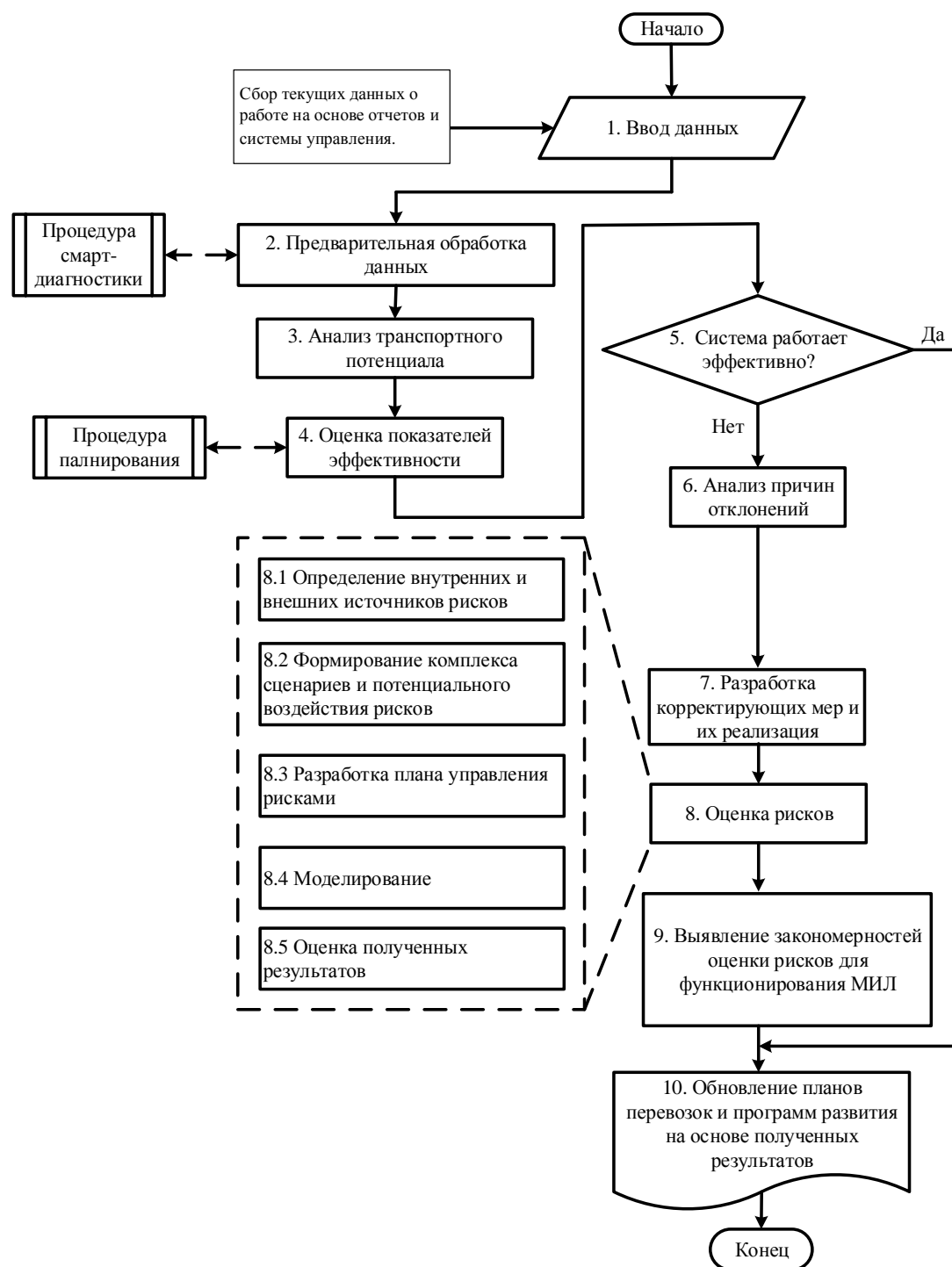


Рис. 3. Процедура контроля показателей работы МИЛ

Процедура контроля показателей работы МИЛ с использованием оценки рисков состоит из сбора данных о работе линий на основе отчетов выполнения показателей. Предварительной обработки данных на основе процедуры смарт-диагностики и анализа транспортного потенциала с использованием оценки текущих возможностей инфраструктуры. В случаях когда МИЛ работает неэффективно, принимается управляющее воздействие о необходимости корректирующих действий или изменении стратегии. Реализуется анализ причин отклонений, идентифицируются и классифицируются отклонения (технических, технологических и экономических показателей) и дается оценка выявленных отклонений.

После чего разрабатываются корректирующие меры, включающие оптимизацию организационных процессов и процедур, оценку ресурсов и временных затрат на реализацию корректирующих мер. При этом предлагается проводить оценку рисков (п. 8 рис. 3) корректирующих мероприятий с использованием следующей последовательности:

1 Определение внутренних и внешних источников рисков, включающих технические, технологические и экономические показатели.

2 Формирование комплекса вариантов эксплуатации и потенциального воздействия рисков и анализ чувствительности системы к различным видам рисков.

3 Разработка плана управления по минимизации негативного воздействия и возможности управления внешними и внутренними рисками.

4 Моделирование. Формирование плана модельных экспериментов и реализация их на модельном комплексе включая сбор и анализ данных по результатам экспериментов.

5 Оценка полученных результатов эксперимента. Корректировка плана управления рисками на основе полученных данных. Внесение изменений в программу управления рисками на МИЛ.

Затем формируются теоретические и практические выводы для оценки рисков показателей работы МИЛ, после чего выполняется корректировка планов перевозок с учетом выявленных рисков и возможностей развития МИЛ, а также пересмотр маршрутов для улучшения эффективности использования железнодорожной транспортной сети.

Постановка задачи оценки рисков эксплуатации МИЛ. Пусть имеется модель системы S , характеризующая работу железнодорожной линии

$$S = \{T, X, U, f, h\}, \quad (1)$$

где T – временной горизонт планирования;

$X(t)$ – вектор состояний системы на момент времени;

$U(t)$ – вектор управляющих воздействий на систему на момент времени t (технические, технологические и экономические мероприятия);

$f(X(t), U(t))$ – функция динамики состояний системы;

$h(X(t))$ – функция измерения показателей эффективности работы железнодорожной линии.

Целевые показатели эффективности работы МИЛ (Y) имеют вид:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}, \quad (2)$$

где y_1, y_2, \dots, y_n – целевые показатели работы линии (например, минимизация затрат, повышение безопасности, увеличение грузопотока).

Риски (R) представляют вероятности наступления неблагоприятных событий при изменении управляющих воздействий:

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}, \quad (3)$$

где r_1, r_2, \dots, r_m – риск нарушения целевого показателя работы линии.

Требуется разработать математическую модель оценки риска нарушения целевых показателей работы МИЛ при внедрении новых управляющих воздействий. При этом функция риска (Φ) для каждого целевого показателя имеет вид:

$$\Phi(y_i, U) = P(Y_i < y_i^*, U); \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где $P(Y_i < y_i^*, U)$ – вероятность того, что фактический показатель эффективности Y_i окажется ниже установленного порога y_i^* при заданном наборе управляющих воздействий U .

Модель системы имеет вид:

$$\begin{aligned} X(t+1) &= f(X(t), U(t)); \forall t \in T, \\ Y(t) &= h(X(t)); \forall t \in T. \end{aligned} \quad (5)$$

Требуется решить оптимизационную задачу минимизации рисков:

$$\min_U \sum_{i=1}^n w_i \Phi(y_i, U), \quad (6)$$

где w_i – весовые коэффициенты значимости показателей.

При накладываемом ограничении, по которому управляющее воздействие $U(t)$ должно находиться в допустимых пределах временного горизонта планирования,

$$U(t) \in U_d; \forall t \in T. \quad (7)$$

Таким образом, задача сводится к поиску набора управляющих воздействий, который минимизирует риски нарушения целевых показателей работы железнодорожной линии, учитывая ограничения на ресурсы и другие условия работы системы.

Модель оценки рисков изменения технических, технологических и экономических показателей МИЛ позволяет дать качественную оценку мероприятий по повышению эффективности работы. Отличие предлагаемой модели является учет временных аспектов жизненного цикла линии, сезонной неравномерности перевозок и корреляционных зависимостей между показателями.

Исходные данные представлены набором технических, технологических и экономических показателей МИЛ. Технические показатели $T(t) = \{T1(t), T2(t), \dots, Tn(t)\}$, к которым относятся:

1 Коэффициент надежности железнодорожной инфраструктуры:

$$k_n = \frac{t_{\sigma}}{t_o}, \quad (8)$$

где t_{σ} – время безотказной работы;

t_o – общее время эксплуатации.

Принимается в соответствии с нормативными документами для однопутных неэлектрифицированных линий 0,92.

2 Коэффициент использования тягового подвижного состава:

$$k_m = \frac{l_{\phi}}{l_n}, \quad (9)$$

где l_{ϕ} – фактический пробег тягового подвижного состава;

l_n – плановый пробег тягового подвижного состава.

3 Система СЦБ (принимается, для упрощения вычислений, при эксплуатации электрожелезной системы (ЭЖС) = 0,3; полуавтоматической блокировки (ПАБ) = 0,5; и автоматической блокировки (АБ) = 0,8).

4 Коэффициент использования линии

$$K_u = \frac{N_{нотр}}{N_{налич}}, \quad (10)$$

$N_{нотр}$ – потребная пропускная способность участка;

$N_{налич}$ – наличная пропускная способность участка.

Технологические показатели $G(t) = \{G1(t), G2(t), \dots, Gm(t)\}$, к которым относятся:

1 Количество грузовых поездов $N_{zp} \leq 16$;

2 Грузонапряженность (I), не более 5 млн т-км брутто/км;

3 Количество вагонов с грузовыми операциями n_{zp} , ваг/сут;

4 Общее количество отправляемых вагонов:

$$\sum N_{om} = \sum N_{\sigma n} + \sum N_{cn} + \sum N_m. \quad (11)$$

где $\sum N_{\sigma n}$ – количество вагонов без переработки;

$\sum N_{cn}$ – количество вагонов с переработкой;

$\sum N_m$ – количество местных вагонов.

Экономические показатели $E(t) = \{E1(t), E2(t), \dots, Ek(t)\}$, к которым относятся:

- 1 Расходы по службам инфраструктуры, движения и тяги, (P) млн руб.
- 2 Выручка за грузовые, пассажирские, пригородные перевозки (B), млн руб.
- 3 Эксплуатационные затраты на 1 км железной дороги:

$$\mathcal{E}_3 = \frac{\sum P}{L}, \quad (12)$$

L – протяженность линии.

- 4 Финансовый результат (Φ) млн руб./год:

$$\Phi = \frac{B}{P} \cdot 100\%. \quad (13)$$

Показатели $T(t)$, $G(t)$, $E(t)$ являются случайными величинами с заданными средними значениями и ковариационной матрицей, учитывающей корреляции между показателями.

Переменные в ковариационной матрице могут иметь положительные и отрицательные значения в зависимости от характера взаимосвязей между показателями на этапе диагностики с использованием нечетких когнитивных карт.

Сезонные колебания неравномерности транспортных потоков учитываются периодической функцией к средним значениям показателей в виде вектора в момент времени t , имеющим вид:

$$X(t) = \mu(t) + S(t) + \epsilon(t), \quad (14)$$

где $\mu(t)$ – вектор средних значений показателей;

$S(t)$ – сезонная неравномерность;

$\epsilon(t)$ – случайная ошибка с заданной ковариационной матрицей.

Оценка эффективности эксплуатации МИЛ реализуется на основе набора технических, технологических и экономических показателей, преобразованных с помощью нелинейной функции, имеющей вид:

$$F(t) = a \cdot \sum_{i=1}^n w_{Ti} \cdot T_i' + b \cdot \sum_{j=1}^m w_{Gj} \cdot G_j' + c \cdot \sum_{k=1}^k w_{Ek} \cdot E_k' + d \cdot \prod_{i,j,k} (T_i, G_j, E_k), \quad (15)$$

где T', G', E' – преобразованные значения технических, технологических и экономических показателей;

a, b, c, d – весовые значения элементов;

$\prod_{i,j,k} (T_i, G_j, E_k)$ – произведение значений преобразованных показателей для оценки полученного

результата.

Показатели T, G, E преобразуются с помощью нелинейной функции гиперболического тангенса в виде $T_i' = f_T(T_i)$, $G_i' = f_G(G_i)$, $E_i' = f_E(E_i)$.

Преимуществами использования функции гиперболического тангенса по сравнению с другими функциями является использование значения в диапазоне $[-1, 1]$, что позволяет эффективно обрабатывать данные, т. к. среднее значение активаций ближе к нулю, а также функции гиперболического тангенса имеют более крутой градиент ближе к 0, что позволяет учитывать небольшие изменения входных данных. Функция гиперболического тангенса сигмоидальной функции имеет вид

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (16)$$

где e – основание натурального логарифма

e^x – экспоненциальная функция, которая показывает, как быстро увеличивается функция по мере роста x ;

e^{-x} – экспоненциальная функция для отрицательного x , которая уменьшается по мере увеличения x ;

$e^x - e^{-x}$ – разница между значениями определяет амплитуду колебания функции.

Среднее значение преобразованных технических показателей T' есть среднее значение всех преобразованных показателей и отражает общее техническое состояние.

После определения набора показателей реализуется оценка рисков эффективности эксплуатации МИЛ по следующей последовательности:

1 Генерация вариантов показателей на основе заданных распределений и ковариационной матрицы методом Монте-Карло [12–15].

2 Расчет функции эффективности для каждого варианта.

3 Вычисление вероятности того, что значение функции эффективности опустится ниже заданного порога F_{min} .

$$R(t) = P(F(t) < F_{min}). \quad (17)$$

4 Реализуется байесовское обновление параметров на основе новых данных по мере их поступления.

5 Анализ результатов и принятие решений о целесообразности проводимых мероприятий.

Представленный набор показателей позволяет комплексно оценить риски показателей работы МИЛ при разработке мероприятий по повышению эффективности их эксплуатации.

Рассмотрим более подробно блок 8, включающий процедуру контроля эксплуатации МИЛ на основе оценки рисков (рис. 3). Определение внутренних и внешних источников рисков формируется по набору средних значений показателей X_n (выражений (8–15)) в виде матрицы (A):

$$(A) = \begin{pmatrix} 0,92 & 0,6 & 0,5 & 0,4 \\ 0,5 & 0,5 & 0,3 & 0,65 \\ 0,6 & 0,4 & 0,63 & -0,2 \end{pmatrix}$$

Средние значения показателей определены с использованием метода min–max нормализации в диапазоне значений $[-1, 1]$ с использованием формулы

$$X_n = 2 \cdot \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} - 1, \quad (18)$$

где X – исходное значение;

X_{max}, X_{min} – максимальное и минимальное значение в вариационном ряду.

Достоинством применяемого метода минимаксной нормализации является простота интерпретируемости результатов, сохранение структуры данных и учет взаимосвязей значений показателей.

Формирование комплекса вариантов появления рисков для МИЛ основан на анализе возможных технических, технологических и экономических рисков, их взаимосвязей и возможности возникновения комплексных кризисных ситуаций.

Технические риски возникают вследствие устаревания инфраструктуры, недостаточного уровня технического обслуживания, а также возможных отказов оборудования. Технологические риски возникают в связи с нарушением технологии эксплуатации МИЛ. Экономические риски зависят от тарифной политики, цен на ресурсы и изменение объемов перевозок.

Для комплексного подхода к разработке вариантов рассмотрены различные комбинации перечисленных рисков, их синергетическое взаимодействие и вероятность возникновения критических ситуаций. Рассмотрен следующий набор вариантов.

Вариант 1. Отрицательный экономический результат эксплуатации МИЛ. Вызванный низкими

размерами перевозок в пассажирском и грузовом сообщении, при этом затраты на содержание инфраструктуры превышают получаемый доход перевозочных видов деятельности. При этом порог эффективности составляет $[-0,2; -0,1]$.

Вариант 2. Нулевой экономический результат эксплуатации МИЛ. Вызванный незначительным увеличением размеров перевозок в пассажирском и грузовом сообщении, при этом затраты на содержание инфраструктуры равны получаемый доход перевозочных видов деятельности. При этом порог эффективности составляет 0.

Вариант 3. Положительный экономический результат эксплуатации МИЛ. Вызванный увеличением размеров перевозок в пассажирском и грузовом сообщении, при этом затраты на содержание инфраструктуры меньше получаемого дохода от перевозочных видов деятельности, эффективность МИЛ составляет $[0,1; 1]$.

После идентификации и формирования вариантов проведено моделирование оценки вероятности возникновения альтернатив, с использованием метода Монте-Карло для оценки вероятностного распределения рисков и их совокупного воздействия на показатели (таблица).

Оценка рисков с учетом временного горизонта

| Временные периоды | Порог эффективности | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| | -0,2 | -0,1 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,100 | 0,89 | 1,00 | 1,00 |
| 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,010 | 0,61 | 1,00 | 1,00 |
| 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,020 | 0,35 | 0,99 | 1,00 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,29 | 0,97 | 1,00 |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,41 | 0,98 | 1,00 |
| 6 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,020 | 0,70 | 1,00 | 1,00 |
| 7 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,100 | 0,95 | 1,00 | 1,00 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,100 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 9 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,470 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,790 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,740 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,370 | 0,97 | 1,00 | 1,00 |

На основании проведенной оценки формируются стратегии по минимизации воздействия рисков и обновляется план перевозок и программа развития на основе полученных результатов.

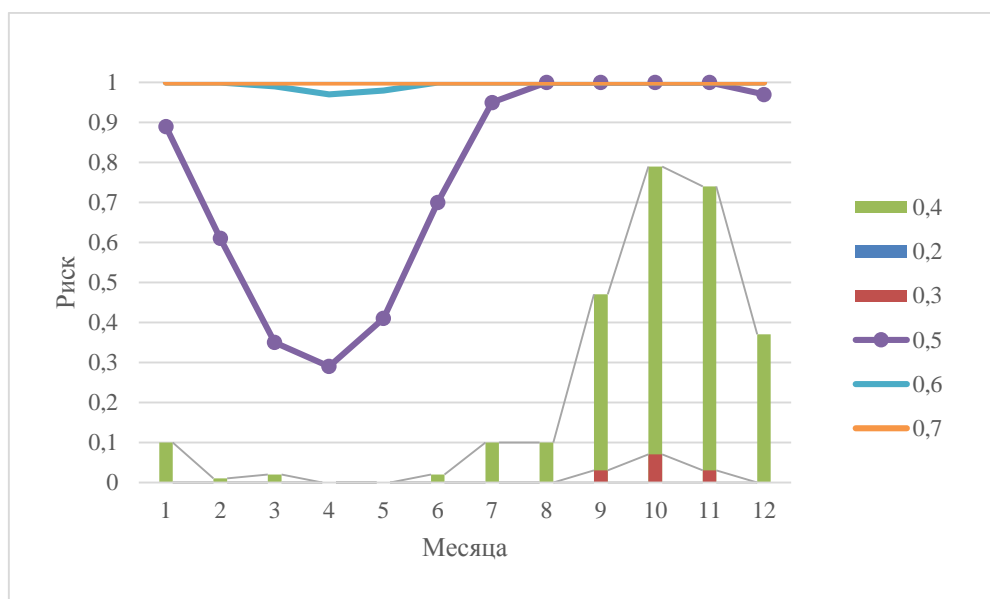


Рис. 4. Воздействие рисков на технические, технологические, и экономические показатели при заданных порогах эффективности линии

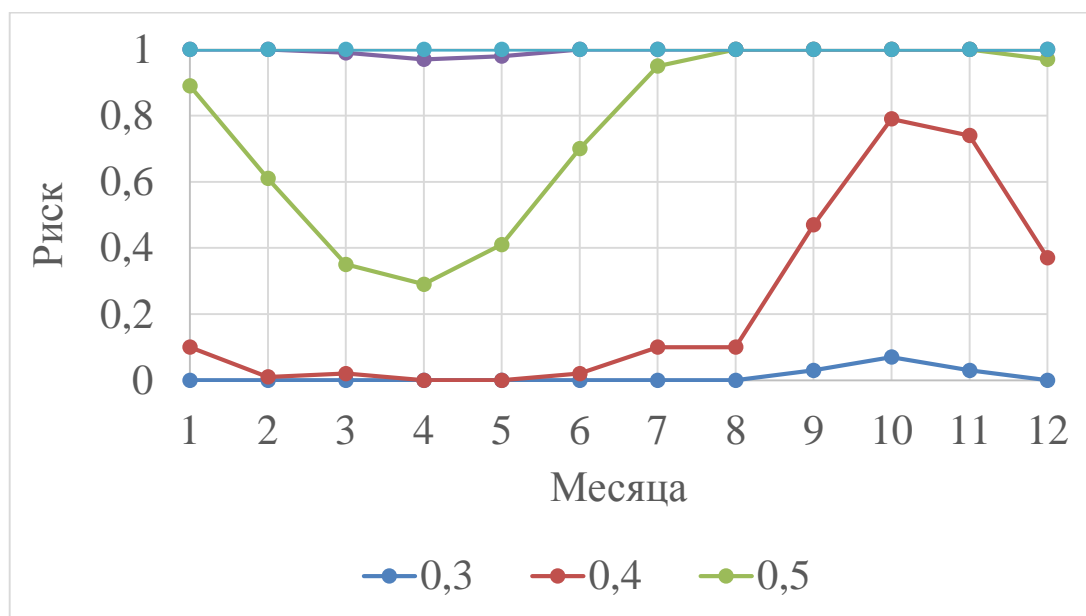


Рис. 5. Детализация рисков на технические технологические, и экономические показатели при положительной эффективности линии в диапазоне 0,3÷0,5

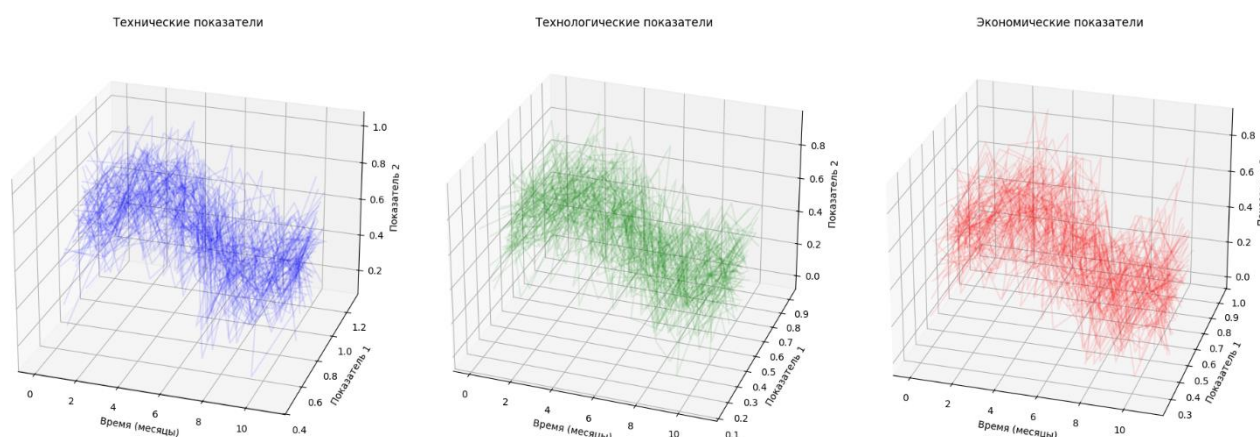


Рис. 6. Графики формирования вариантов оценки рисков от набора технических, технологических и экономических показателей

Как видно из таблицы и рис. 4–6, при эффективности эксплуатации МИЛ в диапазоне от $-0,2$ до $0,2$ риск невыполнения показателей отсутствует, что свидетельствует о возможности положительного финансового результата при существующей технологии работы и имеющемся грузопотоке. Рост риска невыполнения комплекса технических, технологических и экономических показателей наблюдается на пороге эффективности от $0,3$ до $0,6$. При эффективности работы более $0,6$ вероятность риска составляет 1 , что характеризует невозможность выполнения перечисленных показателей.

Выводы

В результате проведенного исследования установлен сложный характер учета рисков в логистических транспортных системах, функционирующих на базе МИЛ. Эти линии, в силу специфики своей эксплуатации и низких размеров перевозок, подвержены ряду специфических рисков, которые отсутствуют на большинстве линий других категорий, что связано с неправомерностью перевозок, ограниченными ресурсами на поддержание инфраструктуры.

В этом контексте предложенный интегрированный механизм контроля показателей работы позволяет обеспечить своевременное выявление и оценку рисков на ранних этапах их возникновения.

Преимуществом предложенного механизма является способность объединять набор технических, технологических и экономических показателей, что позволяет получить комплексное представление о состоянии МИЛ.

Интегрированный механизм контроля дает возможность адаптировать предлагаемые технические, технологические и экономические изменения в работе МИЛ, что обеспечивает гибкость и адаптивность эксплуатации таких линий. Применение предлагаемого механизма позволит оптимизировать использование ресурсов и улучшит экономический результат эксплуатации МИЛ.

Список литературы

1 Транспортно-логистические системы в условиях системных изменений в экономике / Э. А. Мамаев, А. Н. Гуда, В. А. Финоченко, К. А. Годованый // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

2 Долгий, А. И. Интеллектуальный мониторинг перевозочных процессов на основе динамического метода главных компонент / А. И. Долгий, С. М. Ковалев, А. Н. Гуда // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2 (90). – С. 240–251. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_240.

3 The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management / Y. K. Chan, P. Gaffney, K. Neailey, W. H. Ip // The TQM Magazine. – 1998. – Vol. 10, No. 6. – P. 420–424. – DOI 10.1108/09544789810239146.

4 Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects / C. J. Purnell, G. Frommer, K. Chan, A. A. Auch // Radiation Protection Dosimetry. – 2004. – Vol. 108, No. 4. – P. 353. – DOI 10.1093/rpd/nch035.

5 Ballis, A. Issues on railway wagon asset management using advanced information systems / A. Ballis, L. Dimitriou // Transportation Research Part C : Emerging Technologies. – 2010. – Vol. 18, No. 5. – P. 807–820. – DOI 10.1016/j.trc.2009.09.003.

6 Никитин, А. Б. Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малодетальных линиях / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5, № 1. – С. 45–61. – DOI 10.20295/2412-9186-2019-1-45-61.

7 Interaction of Intensive and Low-Density Lines : Management Approach and Models. In : A. Manakov, A. Edigarian [et al.]. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // TransSiberia – 2021. 8 Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 402. – Springer, Cham. – DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_76.

8 Кириленко, О. Н. Экономическая эффективность методов эксплуатации малодетальных линий / О. Н. Кириленко // Экономика железных дорог. – 2014. – № 8. – С. 79–85. – ISSN 1727-6500.

References

1 Transport and logistics systems in the context of systemic changes in the economy / E. A. Mamaev, A. N. Guda, V. A. Finochenko, K. A. Godovany // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2022. – No. 2 (86). – P. 145–154. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_2_145.

2 Dolgiy, A. I. Intelligent monitoring of transportation processes based on the dynamic method of principal components / A. I. Dolgiy, S. M. Kovalev, A. N. Guda // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 2 (90). – P. 240–251. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_240.

3 The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management / Y. K. Chan, P. Gaffney, K. Neailey, W. H. Ip // The TQM Magazine. – 1998. – Vol. 10, No. 6. – P. 420–424. – DOI 10.1108/09544789810239146.

4 Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects / C. J. Purnell, G. Frommer, K. Chan, A. A. Auch // Radiation Protection Dosimetry. – 2004. – Vol. 108, No. 4. – P. 353. – DOI 10.1093/rpd/nch035.

5 Ballis, A. Issues on railway wagon asset management using advanced information systems / A. Ballis, L. Dimitriou // Transportation Research Part C : Emerging Technologies. – 2010. – Vol. 18, No. 5. – P. 807–820. – DOI 10.1016/j.trc.2009.09.003.

6 Nikitin, A. B. Possibility of introducing digital radio communication and organizing data transmission between stations on low-density lines / A. B. Nikitin, I. V. Kushpil // Automation in transport. – 2019. – Vol. 5, No. 1. – P. 45–61. – DOI 10.20295/2412-9186-2019-1-45-61.

7 Interaction of Intensive and Low-Density Lines : Management Approach and Models. In : A. Manakov, A. Edigarian [et al.]. International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // TransSiberia – 2021. 8 Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 402. – Springer, Cham. – DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_76.

8 Kirilenko, O. N. Economic efficiency of methods of operating low-density lines / O. N. Kirilenko // Railway Economy. – 2014. – No. 8. – P. 79–85. – ISSN 1727-6500.

9 **Вакуленко, С. П.** Малодеятельные линии : состояние и варианты оптимизации / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15, № 3 (70). – С. 174–180. – DOI 10.30932/1992-3252-2017-15-3-16.

10 Механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий на основе нечеткого когнитивного моделирования / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, И. Л. Сакович, В. А. Болотин // Автоматика на транспорте. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 72–86. – DOI 10.20295/2412-9186-2023-9-01-72-86.

11 **Ковалев, К. Е.** Процедура планирования работы малоинтенсивных железнодорожных линий: логистические аспекты и нейросетевые модели / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2023. – Т. 20, № 2. – С. 325–335. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-2-325-335.

12 **Соболь, И. М.** Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболь ; Главная редакция физико-математической литературы. – Москва : Наука, 1973. – 313 с.

13 **Михайлов, Г. А.** Рандомизированные алгоритмы метода Монте-Карло для задач со случайными параметрами (метод «двойной рандомизации») / Г. А. Михайлов // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 187–200. – DOI 10.15372/SJNM20190205.

14 **Ермаков, С. М.** Метод Монте-Карло для решения систем ОДУ / С. М. Ермаков, Т. М. Товстик // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 411–421. – DOI 10.21638/11701/spbu01.2019.306.

15 **Юнусова, Л. Д.** Анализ методов ценообразования опционов : модель Блэка-Шоулза и метод Монте-Карло / Л. Д. Юнусова // Международный научный журнал. – 2020. – № 4. – С. 64–67. – DOI 10.34286/1995-4638-2020-73-4-64-67.

16 **IN 50324-1992.** Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system) [Тела твердые. Модельные испытания на трение и износ при трении скольжения] : международный (зарубежный) стандарт. ISO 17.040.20. Properties of surfaces [Свойства поверхностей]. Дата опубликования 01.07.1992. Язык оригинала : немецкий. – 6 с. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (дата обращения: 23.10.2024).

17 **ASTM G99-17.** Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (дата обращения: 23.10.2024).

9 **Vakulenko, S. P.** Low-traffic lines : status and optimization options / S. P. Vakulenko, A. V. Kolin, N. Yu. Ev reenova // World of Transport. – 2017. – Vol. 15, No. 3 (70). – P. 174–180. – DOI 10.30932/1992-3252-2017-15-3-16.

10 Mechanism for diagnosing the operation of low-intensity railway lines based on fuzzy cognitive modeling / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin, I. L. Sakovich, V. A. Bolotin // Automation in transport. – 2023. – Vol. 9, No. 1. – P. 72–86. – DOI 10.20295/2412-9186-2023-9-01-72-86.

11 **Kovalev, K. E.** Procedure for planning the operation of low-intensity railway lines: logistic aspects and neural network models / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Proceedings of Petersburg Transport University. – 2023. – Vol. 20, No. 2. – P. 325–335. – DOI 10.20295/1815-588X-2023-2-325-335.

12 **Sobol, I. M.** Numerical Monte Carlo Methods / I. M. Sobol ; Main editorial board of physical and mathematical literature. – Moscow : Nauka, 1973. – 313 p.

13 **Mikhailov, G. A.** Randomized algorithms of the Monte Carlo method for problems with random parameters (the "double randomization" method) / G. A. Mikhailov // Siberian Journal of Computational Mathematics. – 2019. – Vol. 22, No. 2. – P. 187–200. – DOI 10.15372/SJNM20190205.

14 **Ermakov, S. M.** Monte Carlo method for solving ODE systems / S. M. Ermakov, T. M. Tovstik // Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy. – 2019. – Vol. 6, No. 3. – P. 411–421. – DOI 10.21638/11701/spbu01.2019.306.

15 **Yunusova, L. D.** Analysis of options pricing methods : Black-Scholes model and Monte Carlo method / L. D. Yunusova // International Scientific Journal. – 2020. – No. 4. – P. 64–67. – DOI 10.34286/1995-4638-2020-73-4-64-67.

16 **IN 50324-1992.** Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system) [Solid bodies. Model tests for friction and wear during sliding friction] : international (foreign) standard. ISO 17.040.20. Properties of surfaces. Publication date 01.07.1992. Original language : German. – 6 p. – URL: <https://www.standards.ru/document/4024545.aspx> (date of access: 10/23/2024).

17 **ASTM G99-17.** Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. – January 1, 2017. – 6 p. – URL: <https://www.astm.org/g0099-17.html> (date of access: 10/23/2024).

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

RISK ASSESSMENT IN THE OPERATION OF LOW-INTENSIVE RAILWAY LINES

Abstract. Risk assessment of low-intensity railway lines operation allows identifying and significantly reducing potential difficulties in line operation. The article proposes a risk assessment tool for measures to improve the efficiency of low-intensity lines operation, which includes a mechanism for monitoring line performance indicators. The proposed mechanism for monitoring indicators is based on a set of technical, technological and economic indicators, which are random variables with specified average values and a covariance matrix that takes into account correlations between indicators and seasonal unevenness. A set of options for operating low-intensity railway lines (LIL) has been developed, taking into account changes in indicators for selecting effective directions under specified initial conditions. The article presents the results of modeling the assessment of the probability of alternative options using the Monte Carlo method for the probabilistic distribution of risks and their combined impact on indicators. A quantitative and qualitative assessment of possible options for LIL operation is given when its financial result changes.

Keywords: transportation process management, low-intensity lines, required capacity, available capacity, rail transport, risk assessment.

For citation: Kovalev, K. E. Risk assessment in the operation of low-intensity railway lines / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 4. – P. 161–172. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_161.

Сведения об авторах

Ковалев Константин Евгеньевич

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора
Александра I (ПГУПС),
кафедра «Логистика и коммерческая работа»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kovale_kostia@mail.ru

Новичихин Алексей Викторович

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора
Александра I (ПГУПС),
кафедра «Логистика и коммерческая работа»,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: novitchihin@bk.ru

Information about the authors

Kovalev Konstantin Evgenievich

Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University (PGUPS),
Chair «Logistics and Commercial Work»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kovale_kostia@mail.ru

Novichikhin Aleksey Viktorovich

Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University (PGUPS),
Chair «Logistics and Commercial Work»,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of Chair,
e-mail: novitchihin@bk.ru