

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-389

EDN: SMNUAK

УДК 656.259.9



Научная статья | Управление процессами перевозок

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ ГОТОВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НА БАЗЕ ШКАЛЫ ХАРРИНГТОНА

А.В. Горелик, Е.В. Кузьмина

Аннотация

Обоснование. Актуальность исследования обусловлена возрастающими требованиями к надежности и безопасности железнодорожного транспорта. Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики представляют собой сложные технические комплексы, отказ которых может привести к значительным экономическим потерям и нарушению графика движения. Традиционные методы оценки надежности, основанные на анализе единичных показателей, не позволяют проводить комплексную оценку состояния таких систем. Существующий методический вакуум в области интегральной оценки готовности систем ЖАТ определяет необходимость разработки новых подходов, учитывающих многокритериальность задачи и позволяющих агрегировать разнородные показатели в единую оценку.

Цель – разработка методики интегральной оценки уровней готовности технического обеспечения железнодорожных систем на основе математического моделирования и функции желательности Харрингтона, позволяющей осуществлять сравнительный анализ объектов железнодорожной инфраструктуры и обосновывать управленческие решения в области технического обслуживания и модернизации.

Материалы и методы. Исследование основано на применении аппарата полумарковских процессов для моделирования надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Математическая модель включает шесть состояний системы, учитывающих различные этапы жизненного цикла оборудования. Для преобразования разнородных показателей надежности в единую интегральную оценку использована функция желательности Харрингтона, обеспечивающая переход к безразмерной шкале измерений.

Результаты. Разработана методика интегральной оценки уровней готовности систем ЖАТ, сочетающая математическое моделирование на основе полумарковских процессов с преобразованием показателей по функции желательности Харрингтона. Анализ статистики отказов за 2018-2023 годы выявил устойчивую тенденцию к снижению количества отказов по всем категориям оборудования. Практическая апробация методики на десяти железнодорожных станциях позволила идентифицировать проблемные зоны и определить приоритеты технического обслуживания. Реализация алгоритма распределения ресурсов на основе теории игр показала возможность повышения эффективности использования средств на 15% по сравнению с равномерным распределением. Наибольшая доля ресурсов (47,8%) целесообразна для систем СЦБ как наиболее критичных для безопасности движения. Разработанные модели показали адекватность при прогнозировании изменений интегрального показателя готовности.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика; железнодорожная телемеханика; коэффициент готовности; математическое моделирование; теория надежности; полумарковские процессы; функция желательности Харрингтона; интегральный показатель

Для цитирования. Горелик, А. В., & Кузьмина, Е. В. (2025). Математическое моделирование уровней готовности технического обеспечения железнодорожных систем с использованием интегрального показателя на базе шкалы Харрингтона. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 262–284. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-389>

Original article | Transportation Process Management

MATHEMATICAL MODELING OF RAILWAY SYSTEMS TECHNICAL SUPPORT READINESS LEVELS USING AN INTEGRAL INDICATOR BASED ON THE HARRINGTON SCALE

A.V. Gorelik, E.V. Kuzmina

Abstract

Background. The relevance of the study is due to the increasing demands on the reliability and safety of railway transport. Modern railway automation and telemechanics systems are elaborate technical complexes, the failure of which can lead to significant economic losses and disruption of the movement schedule. Traditional reliability assessment methods based on the analysis of single indicators do not allow for a comprehensive assessment of the condition of such systems. The existing methodological vacuum in the area of integrated assessment of the railway automation and telemechanics availability systems determines the need to develop new approaches that take into account the multi-criteria nature of the task and allow aggregating heterogeneous indicators within a single assessment.

Purpose. Methodology development for the integral assessment of the levels of readiness of technical support for railway systems based on mathematical modeling and the Harrington desirability function, which allows for a comparative analysis of railway infrastructure facilities and substantiate management decisions in the area of maintenance and modernization.

Materials and methods. The research is based on the application of the Semimarkov process apparatus for modeling the reliability of railway automation and telemechanics systems. The mathematical model includes six system states that take into account various stages of the equipment lifecycle. The Harrington desirability function was used to transform heterogeneous reliability indicators into a single integrated assessment, providing a transition to a dimensionless measurement scale.

Results. A method for the integral assessment of the levels of readiness of harvest systems has been developed, combining mathematical modeling based on semi-Markov processes with the transformation of indicators by the Harrington function. An analysis of failure statistics for 2018-2023 revealed a steady downward trend in the number of failures across all categories of equipment. Practical testing of the methodology at ten railway stations made it possible to identify problem areas and determine maintenance priorities. The implementation of the resource allocation algorithm based on game theory has shown the possibility of increasing the efficiency of using funds by 15% compared with uniform allocation. The largest share of resources (47.8%) is appropriate for safety control systems as the most critical for traffic safety. The developed models have shown adequacy in predicting changes in the integral readiness indicator.

Keywords: railway automation; railway telemechanics; readiness coefficient; mathematical modeling; reliability theory; semi-Markov processes; Harrington desirability function; integral indicator

For citation. Gorelik, A. V., & Kuzmina, E. V. (2025). Mathematical modeling of railway systems technical support readiness levels using an integral indicator based on the Harrington scale. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 262–284. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-389>

Введение

Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) являются критически важными для обеспечения безопасности и эффективности перевозочного процесса [1; 2]. Их отказ может привести к значительным материальным потерям и нарушению графика движения поездов. В этой связи управление надежностью технического обеспечения выходит на первый план.

Традиционно надежность устройств ЖАТ оценивается через вероятностно-временные показатели, среди которых ключевым является коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент

времени [3, 4]. Однако при эксплуатации сложных систем возникает задача одновременного учета нескольких таких показателей (коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, среднее время восстановления и др.), что представляет собой классическую многокритериальную проблему.

Для решения подобных задач в практике инженерных и экономических исследований успешно применяется метод обобщенной функции желательности Харрингтона [5], который позволяет преобразовать разнородные частные показатели в безразмерную шкалу и агрегировать их в единый интегральный коэффициент. Однако применение данного подхода конкретно к задаче оценки уровней готовности систем ЖАТ в научной литературе освещено недостаточно.

Математическое моделирование надежности систем ЖАТ на основе полумарковских процессов

Для сложных восстанавливаемых систем, каковыми являются устройства ЖАТ, адекватной математической моделью служат полумарковские процессы (ПМП). Данный подход позволяет учесть неэкспоненциальные распределения времени безотказной работы и восстановления, что более соответствует реальной эксплуатационной практике [6; 7].

Функционирование объекта представляется как процесс с дискретным множеством состояний $E = \{e_0, e_1, \dots, e_k\}$, которое разделяется на подмножество работоспособных состояний E^+ и неработоспособных состояний E^- .

Коэффициент готовности системы в стационарном режиме определяется как вероятность пребывания ПМП в подмножестве E^+ и рассчитывается по формуле:

$$K_r = \frac{\sum_{i \in E^+} \pi_i \cdot m_i}{\sum_{i \in E^+} \pi_i \cdot m_i + \sum_{j \in E^-} \pi_j \cdot m_j}$$

где π_i, π_j – стационарные вероятности вложенной цепи Маркова, определяемые из системы уравнений:

$$\pi_j = \sum_{i \in E} \pi_i p_{ij}, \sum_{i \in E} \pi_i = 1$$

- p_{ij} – вероятность перехода из состояния i в состояние j ;
- m_i, m_j – среднее время пребывания процесса в состояниях i и j соответственно.

Обобщенная функция желательности Харрингтона

Метод функции желательности Харрингтона предназначен для свертки нескольких частных показателей в один обобщенный [8]. Процедура преобразования включает два основных этапа:

1. Перевод частных показателей в безразмерную шкалу желательности. Каждый конкретный показатель x_i преобразуется в частную желательность d_i помощью следующей функции:

$$d_i = \exp(-\exp(-y_i))$$

где y_i – кодированное значение показателя x_i , полученное в результате линейного или нелинейного преобразования, обеспечивающее соответствие шкале от -2 до +5.

2. Вычисление обобщенного показателя желательности. Интегральная оценка D рассчитывается как среднее геометрическое частных желательностей:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}$$

Полученные числовые значения уровня желательности согласно таблице 1.

Таблица 1.

Вербально-числовая интерпретация шкалы желательности Харрингтона

Уровень желательности	Числовой интервал	Содержательное описание
Очень высокий	0,80 – 1,00	Система близка к пределу своего развития
Высокий	0,64 – 0,80	Система имеет высокий запас улучшения
Средний	0,37 – 0,64	Система требует внимания и модернизации
Низкий	0,20 – 0,37	Состояние системы неудовлетворительное
Очень низкий	0,00 – 0,20	Состояние системы критическое

Методика интегральной оценки уровня готовности систем ЖАТ

Предлагаемая методика включает последовательность из пяти шагов.

Шаг 1. Формирование перечня частных показателей. На основе регламентирующих документов и возможностей систем мониторинга выбираются ключевые показатели надежности [9]. В качестве базовых рекомендуется использовать:

K_r – коэффициент готовности;

K_{Or} – коэффициент оперативной готовности;

T_B – среднее время восстановления;

λ – интенсивность отказов.

Шаг 2. Расчет значений частных показателей. Для каждого оцениваемого объекта (станция, перегон, система) рассчитываются выбранные показатели. Расчет K_r может производиться по математическим моделям на основе ПМП или по данным эксплуатационной статистики.

Шаг 3. Нормирование частных показателей и перевод в шкалу желательности. Для каждого показателя устанавливаются граничные значения: x_{min} (наихудшее, допустимое) и x_{max} (наилучшее, целевое). Фактическое значение x_i преобразуется в кодированное значение y_i по формуле линейного преобразования:

$$y_i = a + \frac{(b - a)(x_i - x_{min})}{x_{max} - x_{min}}.$$

где $[a, b]$ – эффективный диапазон шкалы кодированных значений (например, $[-2, 5]$).

Далее рассчитывается частная желательность $d_i = \exp(-\exp(-y_i))$.

Шаг 4. Расчет интегрального показателя уровня готовности. Обобщенный коэффициент готовности D_{som} вычисляется как среднее геометрическое всех частных желательностей d_i .

Шаг 5. Анализ и интерпретация результатов. Полученное значение D_{som} соотносится с вербальной шкалой (Таблица 1), что позволяет ранжировать объекты, выявлять проблемные зоны и обосновывать управленческие решения.

Усовершенствованная модель полумарковского процесса

Для сложных систем ЖАТ рассмотрим расширенную модель с шестью состояниями.

1. E_0 – работоспособное состояние (новая система)
2. E_1 – работоспособное состояние (система с признаками старения)
3. E_2 – работоспособное состояние (предотказное состояние)
4. E_3 – плановое техническое обслуживание
5. E_4 – внеплановый ремонт
6. E_5 – капитальный ремонт

Матрица переходных вероятностей:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & p_{01} & 0 & p_{03} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{12} & p_{13} & p_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ p_{30} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{40} & p_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{50} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

На рис. 1 представлена динамика вероятностей состояний системы железнодорожной автоматики и телемеханики, полученная путем численного решения системы уравнений Колмогорова [10]. График показывает эволюцию вероятностей нахождения системы в различных состояниях во времени, что позволяет анализировать переходные процессы и стационарные режимы работы оборудования.

График построен на основе решения системы дифференциальных уравнений Колмогорова для полумарковской модели с шестью состояниями. По оси X отложено время в часах, по оси Y – вероятности состояний. Кривые демонстрируют переход системы от начального состояния E_0 (работоспособное состояние новой системы) к стационарному распределению, что позволяет оценить время выхода на установившийся режим работы.

На основе отчетов РЖД и международных исследований [11] была собрана статистика надежности устройств ЖАТ за период 2018-2023 годов (таблица 2).

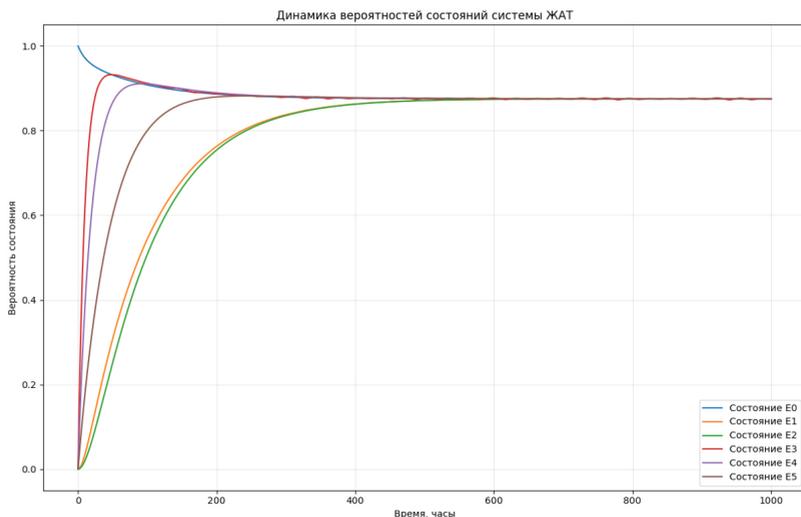


Рис. 1. Динамика вероятностей состояний системы железнодорожной автоматики и телемеханики.

Таблица 2.

Статистика отказов устройств ЖАТ (2018-2023)

Год	Системы СЦБ	Устройства АЛС	Системы связи	Энергоснабжение	Всего отказов
2018	124	87	156	203	570
2019	118	85	148	195	546
2020	115	82	142	188	527
2021	109	78	135	179	501
2022	105	75	128	172	480
2023	98	72	121	165	456

На рис. 2 представлена визуализация этих данных, показывающая как общую динамику отказов по годам, так и распределение отказов по типам систем в 2023 году.

Данные (рис. 2) демонстрируют устойчивую тенденцию к снижению количества отказов по всем категориям оборудования, что свидетельствует о повышении общей надежности систем.

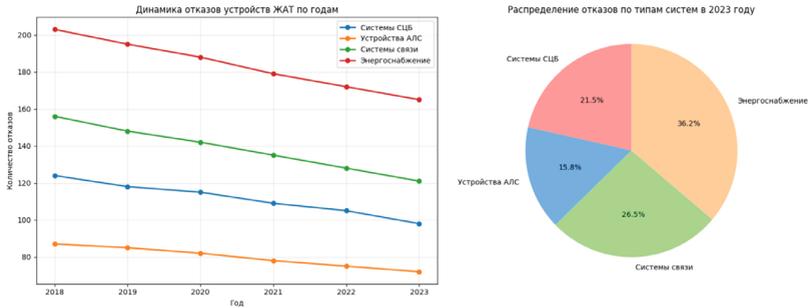


Рис. 2. Статистика отказов устройств ЖАТ за период 2018-2023 гг.

Расчет коэффициента готовности с учетом сезонности

Для учета реальных эксплуатационных условий была разработана модель коэффициента готовности с сезонной составляющей [12; 13]. На рис. 3 представлена динамика коэффициента готовности за трехлетний период, включающая как суточные колебания, так и сезонные тренды.

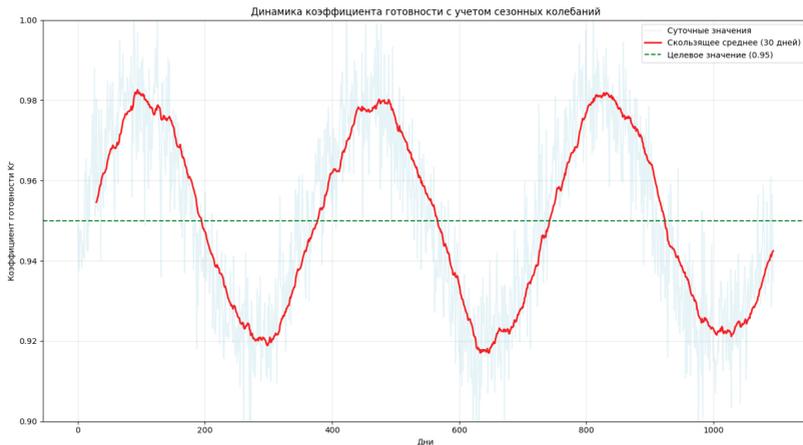


Рис. 3. Динамика коэффициента готовности с учетом сезонных колебаний

График показывает изменение коэффициента готовности K_T за 3 года. Наблюдаются выраженные сезонные колебания с ухуд-

шением показателей в зимний период, что связано с повышенной нагрузкой на оборудование и сложными погодными условиями.

Многокритериальная оптимизация с использованием теории игр

Задача распределения ресурсов между различными типами систем ЖАТ была формализована как задача многокритериальной оптимизации [14]. На рис. 4 представлены результаты оптимального распределения ресурсов между системами СЦБ, АЛС и связи при ограниченном бюджете.

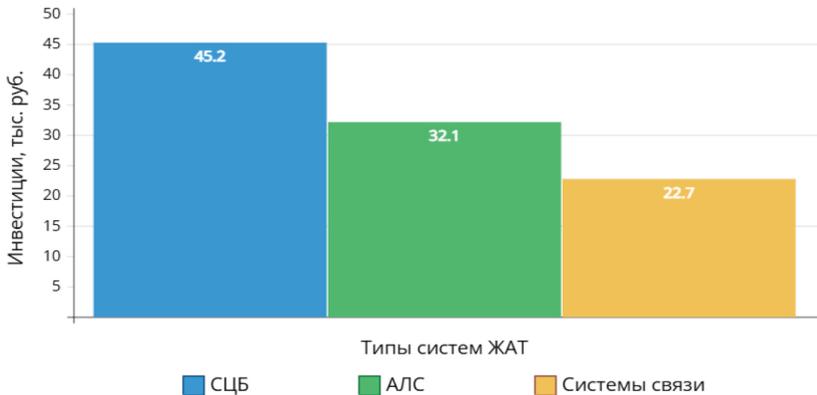


Рис. 4. Оптимальное распределение ресурсов между системами ЖАТ

Столбчатая диаграмма (рис. 4) показывает оптимальные инвестиции в тысячи рублей для трех типов систем: СЦБ, АЛС и системы связи. Расчеты проведены с использованием методов нелинейной оптимизации при ограничении общего бюджета в 100000 тыс. рублей. Результаты демонстрируют, что наибольшие инвестиции требуются в системы СЦБ как наиболее критичные для безопасности движения.

Для демонстрации практического применения методики был проведен расчет интегрального показателя для десяти смоделированных железнодорожных станций. На рис. 5 представлена те-

пловая карта значений желательности, позволяющая визуально оценить состояние каждой станции по всем рассматриваемым показателям.

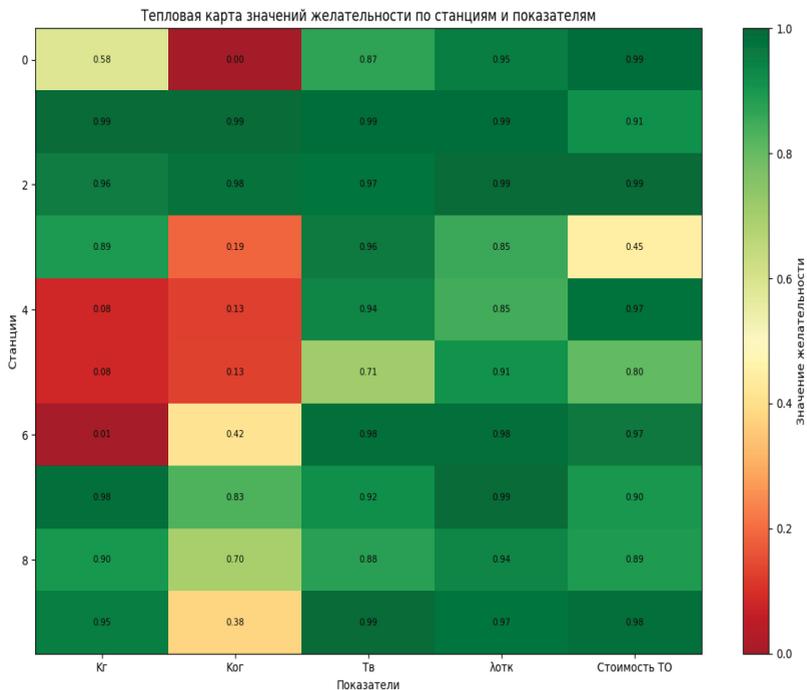


Рис. 5. Тепловая карта значений желательности по станциям и показателям

Матрица (рис. 5) визуализирует значения частных желательностей для пяти показателей (Кг, Ког, Тв, лотк, Стоимость ТО) по десяти станциям. Цветовая шкала от красного (низкие значения) до зеленого (высокие значения) позволяет быстро идентифицировать проблемные зоны [15].

Трехмерная визуализация зависимости показателей

Для углубленного анализа взаимосвязей между основными показателями надежности была создана комплексная трехмерная

визуализация. На рис. 6-9 представлены четыре типа графиков, демонстрирующие различные аспекты зависимостей между параметрами системы.

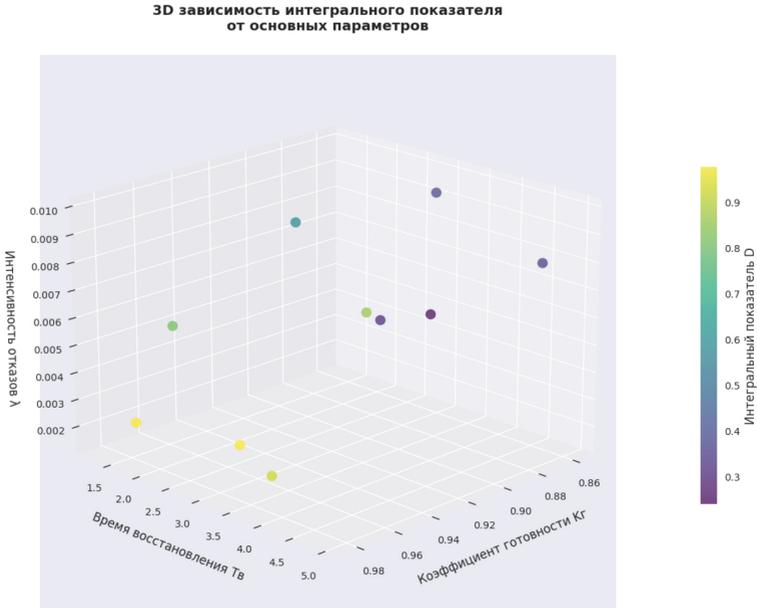


Рис. 6. 3D зависимость интегрального показателя от основных параметров

На рис. 6 представлена трехмерная диаграмма рассеяния, демонстрирующую взаимосвязь между ключевыми параметрами надежности и интегральным показателем. По оси X отложен коэффициент готовности (K_r), характеризующий вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии. По оси Y представлено время восстановления ($T_{в}$), отражающее среднюю продолжительность ремонтных работ. По оси Z отображена интенсивность отказов (λ), показывающая частоту возникновения неисправностей [16]. Цветовая градация точек от фиолетового к желтому соответствует значениям интегрального показателя D , вычисленного на основе функции Харрингтона. Анализ диаграммы выявляет чет-

кую корреляционную зависимость: кластеры с высокими значениями интегрального показателя (желтые точки) сосредоточены в области высокого K_T ($>0,95$), низкого T_B ($<2,5$ часов) и минимальной интенсивности отказов ($\lambda < 0,004$). Напротив, точки с низким интегральным показателем (фиолетовые) группируются в зоне пониженного K_T ($<0,90$), увеличенного времени восстановления (>4 часов) и повышенной частоты отказов.

Поверхность отклика интегрального показателя

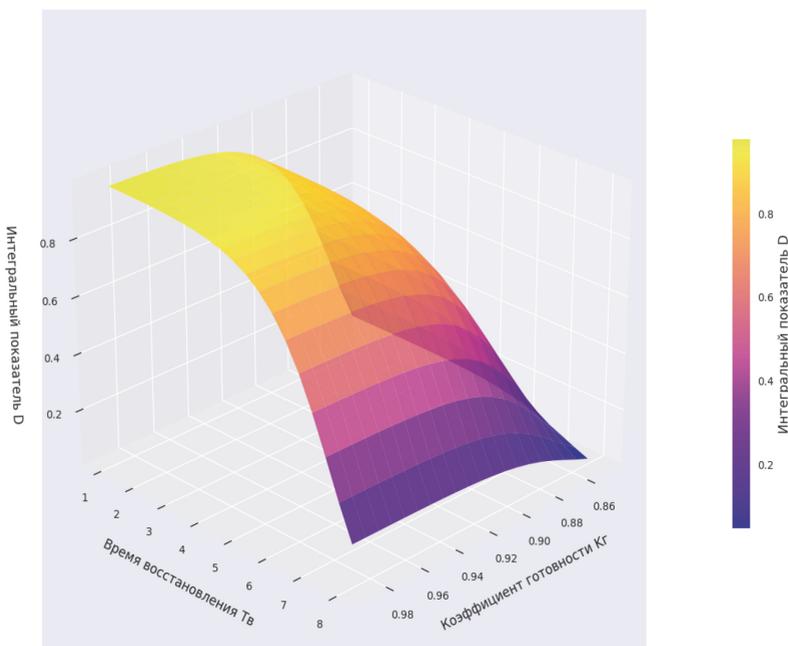


Рис. 7. Поверхность отклика интегрального показателя

На рис. 7 изображена поверхность отклика интегрального показателя в зависимости от коэффициента готовности и времени восстановления при фиксированных значениях интенсивности отказов ($\lambda=0,005$) и стоимости технического обслуживания. Трехмерная поверхность демонстрирует нелинейный характер зависи-

мости интегрального показателя от анализируемых параметров. Наиболее крутой рост наблюдается при переходе от низких значений K_T (0,85-0,90) к средним (0,90-0,95), что свидетельствует о высокой эффективности первоначальных мероприятий по повышению надежности. Плато в области высоких значений K_T ($>0,97$) и малых T_B (<2 часов) указывает на достижение точки насыщения, где дальнейшее улучшение параметров дает незначительный прирост интегральной оценки. Градиент цвета от темно-фиолетового к ярко-желтому визуализирует зоны оптимальных значений, где сочетание высокого коэффициента готовности и малого времени восстановления обеспечивает максимальные значения интегрального показателя.

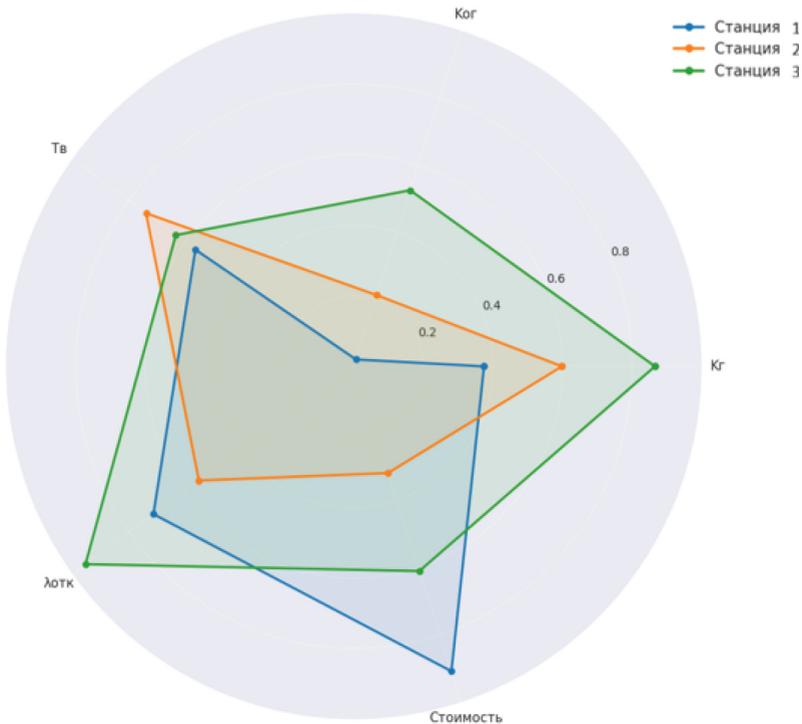


Рис. 8. Полярная диаграмма показателей станций

Полярная диаграмма (рис. 8) позволяет провести сравнительный анализ пяти ключевых показателей для трех выбранных станций. Каждый луч диаграммы соответствует определенному параметру: K_G (коэффициент готовности), K_{OG} (коэффициент оперативной готовности), T_B (время восстановления), $\lambda_{отк}$ (интенсивность отказов) и Стоимость (затраты на техническое обслуживание). Площадь, охватываемая линией каждой станции, отражает общий уровень ее технического состояния. Станция 1 демонстрирует сбалансированные показатели по всем параметрам с незначительным превосходством в коэффициенте готовности. Станция 2 показывает выраженную асимметрию с высокими значениями по стоимости обслуживания при относительно низких показателях надежности, что указывает на неэффективное использование ресурсов. Станция 3 характеризуется оптимальным соотношением всех параметров, образуя практически правильный пятиугольник, что свидетельствует о грамотной организации технического обслуживания.

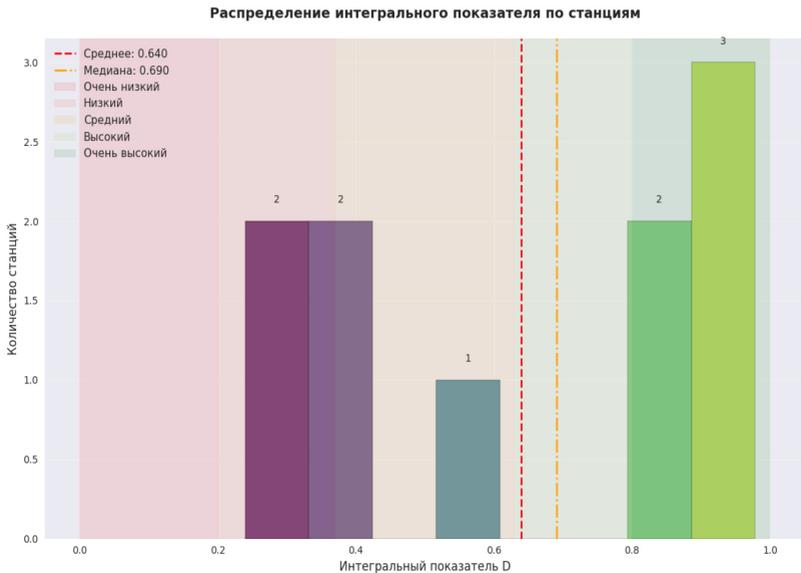


Рис. 9. Распределение интегрального показателя по станциям

На рис. 9 представлена гистограмма распределения интегрального показателя по всем анализируемым станциям с наложенными зонами желательности согласно шкале Харрингтона.

Распределение демонстрирует бимодальный характер с концентрацией станций в зонах «Средний» (0,37-0,63) и «Высокий» (0,63-0,80) уровней готовности. Вертикальные линии среднего (0,642) и медианного (0,635) значений практически совпадают, что указывает на симметричность распределения. Наличие двух станций в зоне «Очень высокий» уровень ($>0,80$) свидетельствует о достижении передового уровня технической эксплуатации, в то время как отсутствие станций в зоне «Очень низкий» уровень ($<0,20$) подтверждает общую удовлетворительность состояния систем ЖАТ [17]. Цветовое кодирование столбцов гистограммы от синего к зеленому дополнительно визуализирует переход от низких к высоким значениям интегрального показателя.

Комплексный анализ представленных визуализаций позволяет идентифицировать критические зоны улучшения, оптимизировать распределение ресурсов и разработать целевые мероприятия по повышению надежности железнодорожных систем на основе объективных количественных оценок.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность предложенного подхода к интегральной оценке уровней готовности систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Использование функции желательности Харрингтона в сочетании с математическим моделированием на основе полумарковских процессов позволяет преодолеть ограничения традиционных методов оценки надежности и обеспечивает возможность комплексного анализа состояния сложных технических систем. Практическая значимость работы заключается в разработке инструментария для поддержки принятия управленческих решений в области технического обслуживания и модернизации железнодорожной ин-

фраструктуры. Полученные результаты создают основу для дальнейшего развития методов прогнозной аналитики и оптимизации ресурсного обеспечения систем железнодорожной автоматики с учетом критериев надежности и экономической эффективности.

Список литературы

1. CENELEC. (2017). *EN 50126-1:2017: Railway applications — The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*. Brussels: CENELEC, 89 p.
2. Соколов, М. М. (2020). *Основы железнодорожной автоматики и телемеханики. Часть 1*. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 79 с. ISBN: 978-5-94941-258-9. EDN: <https://elibrary.ru/FZWRAA>
3. Журавлёв, И. А., Гусев, И. А., Скрипниченко, И. Г., & Курашева, Г. Г. (2022). Алгоритм расчёта коэффициента готовности систем железнодорожной автоматики и телемеханики для вновь проектируемых станций. *Наука и бизнес: пути развития*, 4(130), 136–138. EDN: <https://elibrary.ru/CYHCGG>
4. ГОСТ Р 27.301-2011. (2012). *Надёжность в технике. Расчёт показателей надёжности. Основные положения*. Москва: Стандартинформ, 35 с.
5. Harrington, E. C. (1965). The desirability function. *Industrial Quality Control*, 21(10), 494–498.
6. Линник, И. И., & Линник, Е. П. (2018). Полумарковская модель эксплуатации сложных систем. В *Информационные системы и технологии в моделировании и управлении: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 100-летию Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского* (Ялта, 21–23 мая 2018 года, с. 120–124). Ялта: ООО «Издательство Типография „Ариал“». EDN: <https://elibrary.ru/XVDDLNR>
7. Артеменков, С. Л., Алхимов, В. И., Баранов, С. Н., и др. (2017). *Марковские модели в задачах диагностики и прогнозирования*

- (2-е изд., доп.). Москва: Московский государственный психолого-педагогический университет, 203 с. ISBN: 978-5-94051-168-7. EDN: <https://elibrary.ru/YLIAEY>
8. Любушин, Н. П., & Брикач, Г. Е. (2014). Использование обобщённой функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах. *Экономический анализ: теория и практика*, 18(370).
 9. Сапожников, В. В., Ефанов, Д. В., & Шаманов, В. И. (2017). *Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учебное пособие*. Москва, 318 с.
 10. Колмогоров, А. Н., & Фомин, С. В. (2023). *Элементы теории функций и функционального анализа*. Москва: Физматлит, 576 с.
 11. Горелик, А. В., Неваров, П. А., Орлов, А. В., и др. (2023). Выявление ошибок в данных информационных систем хозяйства автоматики и телемеханики ОАО «РЖД». В *Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов* (с. 82–91). Москва: Российский университет транспорта. EDN: <https://elibrary.ru/FACWZF>
 12. Бугреев, В. А., & Новиков, Е. В. (2010). Математическое моделирование систем и процессов железнодорожного транспорта, обладающих временной избыточностью. *Труды международного симпозиума «Надёжность и качество»*, 1, 364–366. EDN: <https://elibrary.ru/NDKSKZ>
 13. Горелик, А. В., Малых, А. Н., & Орлов, А. В. (2021). Оценка влияния готовности объектов транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» на риски потерь для перевозочного процесса. *Надёжность*, 21(4), 53–56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-53-56>. EDN: <https://elibrary.ru/AQFDPW>
 14. Горелик, А. В., Истомин, А. В., & Кузьмина, Е. В. (2025). О решении задачи распределения ресурсов на модернизацию объектов железнодорожной автоматики с применением методов теории игр. В *Образование, наука и инновации: современные вызовы: материалы Международной научно-практической конференции сту-*

- дентов, аспирантов и молодых учёных (в 2 ч., Мелитополь, 12–13 декабря 2024 года, с. 125–128). Мелитополь: Мелитопольский государственный университет. EDN: <https://elibrary.ru/VUZXTY>
15. Горелик, А. В., Истомин, А. В., Астапенко, Д. В., & Миненков, О. С. (2022). Алгоритм оценки нормативного времени восстановления систем железнодорожной автоматики и телемеханики. *Наукофера*, 4-2, 213–217. EDN: <https://elibrary.ru/JMEUAE>
16. Гнеденко, Б. В., Беляев, Ю. К., & Соловьёв, А. Д. (2024). *Математические методы в теории надёжности: основные характеристики надёжности и их статистический анализ*. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 584 с.
17. *Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте: учебное пособие* (2-е изд., испр. и доп.). (2021). Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 159 с. EDN: <https://elibrary.ru/IFKCVE>

References

1. CENELEC. (2017). *EN 50126-1:2017: Railway applications — The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*. Brussels: CENELEC, 89 p.
2. Sokolov, M. M. (2020). *Fundamentals of railway automation and remote control. Part 1*. Omsk: Omsk State Transport University, 79 p. ISBN: 978-5-94941-258-9. EDN: <https://elibrary.ru/FZWRAA>
3. Zhuravlev, I. A., Gusev, I. A., Skripnichenko, I. G., & Kurasheva, G. G. (2022). Algorithm for calculating the availability coefficient of railway automation and remote control systems for newly designed stations. *Science and Business: Ways of Development*, 4(130), 136–138. EDN: <https://elibrary.ru/CYHCGG>
4. GOST R 27.301-2011. (2012). *Reliability in engineering. Calculation of reliability indicators. Main provisions*. Moscow: Standartinform, 35 p.
5. Harrington, E. C. (1965). The desirability function. *Industrial Quality Control*, 21(10), 494–498.

6. Linnik, I. I., & Linnik, E. P. (2018). Semi-Markov model of complex system operation. In *Information systems and technologies in modeling and management: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 100th Anniversary of V. I. Vernadsky Crimean Federal University* (Yalta, May 21–23, 2018, pp. 120–124). Yalta: LLC “Publishing House Printing House ‘Arial’”. EDN: <https://elibrary.ru/XVDLNR>
7. Artemenkov, S. L., Alkhimov, V. I., Baranov, S. N., et al. (2017). *Markov models in diagnostics and forecasting tasks* (2nd ed., rev. and suppl.). Moscow: Moscow State University of Psychology and Education, 203 p. ISBN: 978-5-94051-168-7. EDN: <https://elibrary.ru/YLIAEY>
8. Lyubushin, N. P., & Brikach, G. E. (2014). Using the generalized Harrington desirability function in multi-parameter economic problems. *Economic Analysis: Theory and Practice*, (18)(370).
9. Sapozhnikov, V. V., Efanov, D. V., & Shamanov, V. I. (2017). *Reliability of railway automation, remote control and communication systems: study guide*. Moscow, 318 p.
10. Kolmogorov, A. N., & Fomin, S. V. (2023). *Elements of function theory and functional analysis*. Moscow: Fizmatlit, 576 p.
11. Gorelik, A. V., Nevarov, P. A., Orlov, A. V., et al. (2023). Detecting errors in data of information systems of the automation and remote control sector of Russian Railways (RZD). In *Modern problems of improving railway transport operations: Interuniversity collection of scientific papers* (pp. 82–91). Moscow: Russian University of Transport. EDN: <https://elibrary.ru/FACWZF>
12. Bugreev, V. A., & Novikov, E. V. (2010). Mathematical modeling of railway transport systems with time redundancy. *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”, (1)*, 364–366. EDN: <https://elibrary.ru/NDKSKZ>
13. Gorelik, A. V., Malykh, A. N., & Orlov, A. V. (2021). Assessing the impact of Russian Railways transport infrastructure readiness on transportation process loss risks. *Reliability*, 21(4), 53–56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-53-56>. EDN: <https://elibrary.ru/AQFDPW>

14. Gorelik, A. V., Istomin, A. V., & Kuzmina, E. V. (2025). On solving the problem of resource allocation for modernizing railway automation facilities using game theory methods. In *Education, science and innovation: Modern challenges: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists* (in 2 parts, Melitopol, December 12–13, 2024, pp. 125–128). Melitopol: Melitopol State University. EDN: <https://elibrary.ru/VUZXTY>
15. Gorelik, A. V., Istomin, A. V., Astapenko, D. V., & Minenkov, O. S. (2022). Algorithm for assessing the standard recovery time of railway automation and remote control systems. *Naukosfera*, 4-2, 213–217. EDN: <https://elibrary.ru/JMEUAE>
16. Gnedenko, B. V., Belyaev, Yu. K., & Solovyov, A. D. (2024). *Mathematical methods in reliability theory: Key reliability characteristics and their statistical analysis*. Moscow: Book House “LIBROKOM”, 584 p.
17. *Automation, remote control and communication in railway transport: study guide* (2nd ed., rev. and suppl.). (2021). Khabarovsk: Far Eastern State Transport University, 159 p. EDN: <https://elibrary.ru/IFKCVE>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Горелик Александр Владимирович, директор академии «Российская открытая академия транспорта», доктор технических наук

Российский университет транспорта

ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация

agorelik@yandex.ru

Кузьмина Елена Витальевна, ассистент «Российская открытая академия транспорта»

Российский университет транспорта

ул. Образцова, 9, стр. 9, г. Москва, 127055, Российская Федерация

kuzminaelena96@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr V. Gorelik, Director of the Academy “Russian Open Academy of Transport”, Doctor of Technical Sciences

Russian University of Transport (MIIT)

9 building 9, Obrazcova Str. Moscow, 127055, Russian Federation

agorelik@yandex.ru

SPIN-code: 9543-4715

Scopus Author ID: 57200751967

Elena V. Kuzmina, Assistant of the Academy “Russian Open Academy of Transport”

Russian University of Transport (MIIT)

9 building 9, Obrazcova Str. Moscow, 127055, Russian Federation

kuzminaelena96@yandex.ru

Поступила 29.10.2025

После рецензирования 18.11.2025

Принята 21.11.2025

Received 29.10.2025

Revised 18.11.2025

Accepted 21.11.2025