

УДК 338.23

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

Кузьмина Елена Витальевна,

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», ассистент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктуры», г. Москва, kuzminaelena96@yandex.ru

Аннотация

В работе исследуются современные подходы к повышению эффективности процессов технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Разработана комплексная методика планирования ремонтных мероприятий, интегрирующая вероятностно-статистические методы, инструменты теории игр и современные цифровые технологии. Предложенные решения позволяют существенно сократить эксплуатационные потери и повысить надежность работы железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика, телемеханика, оптимизация технического обслуживания, цифровизация, теория игр, имитационное моделирование, надежность инфраструктуры.

IMPROVEMENT OF THE MAINTENANCE SYSTEM FOR RAILWAY AUTOMATION AND TELEMCHANICS DEVICES BASED ON DIGITAL TECHNOLOGIES AND OPTIMIZATION METHODS

Kuzmina Elena Vitalievna,

Federal State Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport (MIIT)", Assistant of the Department of Transport Infrastructure Management Systems, Moscow, kuzminaelena96@yandex.ru

ABSTRACT

Improving the maintenance system for railway automation and telemchanics devices based on digital technologies and optimization methodsThe paper explores modern approaches to improving the efficiency of maintenance processes for railway automation and telemchanics devices. A comprehensive methodology for planning repair activities has been developed, integrating probabilistic and statistical methods, game theory tools, and modern digital technologies. The proposed solutions can significantly reduce operational losses and improve the reliability of railway infrastructure.

Keywords: railway automation, telemechanics, maintenance optimization, digitalization, game theory, simulation modeling, and infrastructure reliability.

Современные условия эксплуатации устройств железнодорожной автоматики и телемеханики характеризуются возрастающими требованиями к надежности и бесперебойности работы. Традиционные системы технического обслуживания демонстрируют ограниченную эффективность в условиях роста интенсивности движения и усложнения технических систем. Наблюдаются системные проблемы: повышенная частота отказов оборудования, недостаточная оперативность восстановления работоспособности, отсутствие действенных механизмов прогнозной аналитики и существенное влияние человеческого фактора [1].

Перечисленные проблемы приводят к значительным экономическим потерям, связанным с задержками движения поездов, ростом эксплуатационных расходов и снижением общего уровня безопасности перевозок. В этой связи разработка усовершенствованных методов организации технического обслуживания представляется чрезвычайно актуальной научно-практической задачей.

Методологический аппарат исследования включает комплекс современных методов анализа и оптимизации:

методы вероятностно-статистического моделирования процессов отказов и восстановления;

аппарат теории массового обслуживания для анализа потоков заявок на ремонт;

имитационное моделирование по методу Монте-Карло для оценки временных параметров;

методы теории игр для решения задач распределения ресурсов;

системный анализ и технологии больших данных для обработки статистики отказов.

Такой междисциплинарный подход позволяет учесть многофакторность и стохастичность процессов технического обслуживания.

Классификация инцидентов с устройствами ЖАТ [2] осуществляется по трем категориям критичности:

Категория 1 (критические) – полная остановка движения (сбои систем централизации).

Категория 2 (частичные ограничения) – снижение пропускной способности (отказы АЛСН).

Категория 3 (незначительные) – не влияют на движение, но требуют контроля.

Для количественной оценки эксплуатационных потерь применяется показатель потерь в поездо-часах:

$$\text{ППЧ} = \sum_{i=1}^n (T_{\text{задержки}_i} \times N_{\text{поездов}_i}), \quad (1)$$

где $T_{\text{задержки}_i}$ – продолжительность задержки i -го поезда,

$N_{\text{поездов}_i}$ – количество затронутых поездов.

Визуализация данных осуществлена с использованием диаграмм Парето, позволяющих выделить наиболее значимые с точки зрения частоты и последствий типы отказов.

Рисунок 1 отображает ранжированное распределение отказов по типам устройств за 2021-2022 годы, демонстрирующее приоритетные направления для оптимизации.

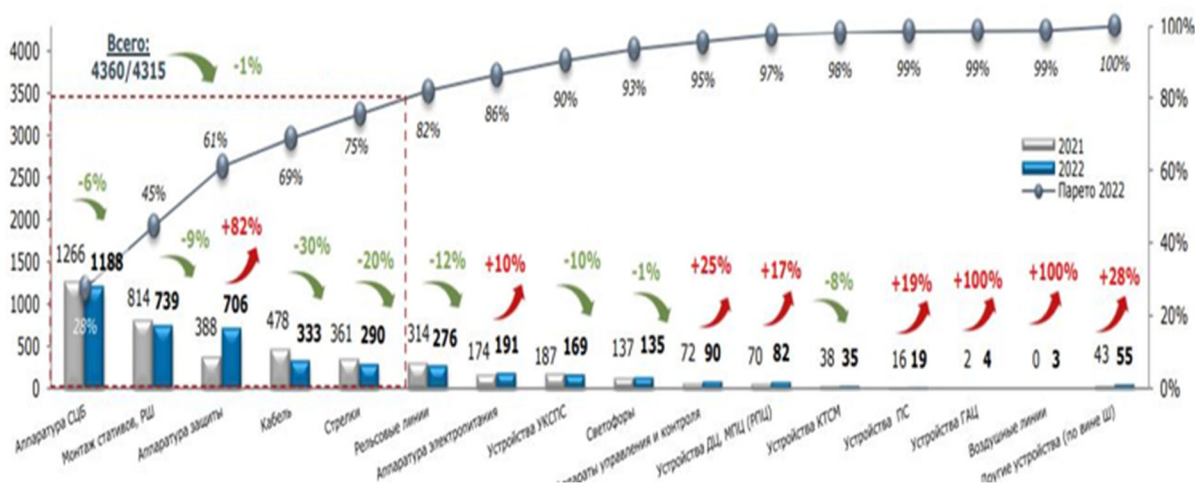


Рисунок 1 – Распределение Парето отказов технических средств 1,2 категории, отнесенных за хозяйством Ш, по устройствам ЖАТ за 12 месяцев 2021/2022 года.

Рисунок 2 представляет аналогичное распределение, но по критерию вызванных потерь в поездо-часах, что позволяет идентифицировать наиболее затратные типы отказов.

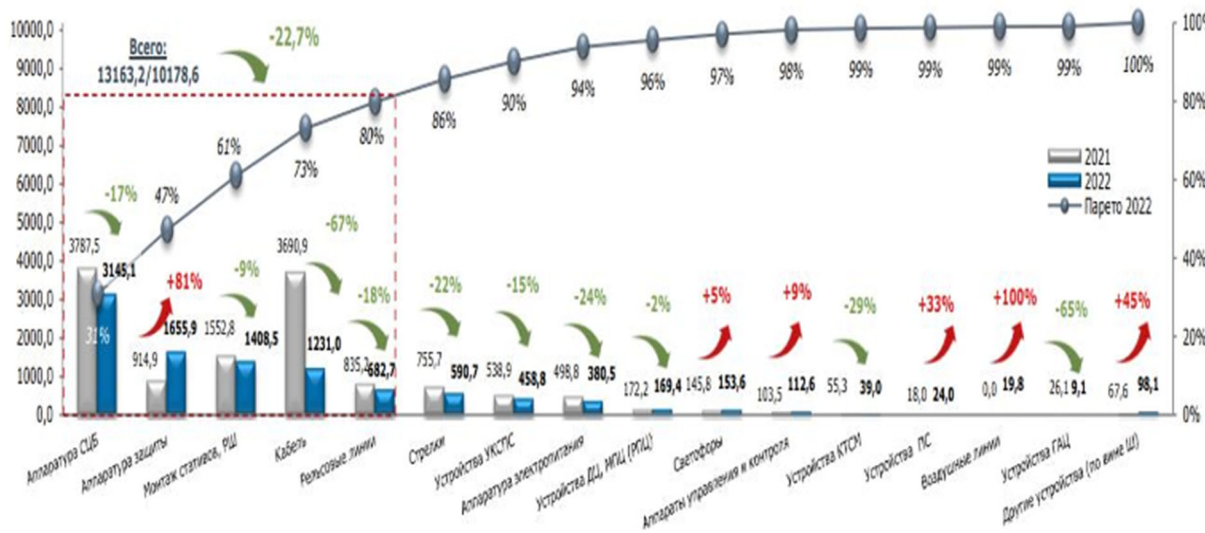


Рисунок 2 – Распределение Парето потерь поездо-часов от отказов технических средств 1,2 категории, отнесенных за хозяйством Ш, по устройствам ЖАТ за 12 месяцев 2021/2022 года

Сравнительный анализ серий диаграмм за периоды 2021-2024 годов показывает положительную динамику: снижение частоты отказов аппаратуры СЦБ на 15%, светофорных систем на 18%, кабельных линий на 12%. Однако отмечается рост инцидентов в категории "Прочие устройства" на 8%.

Разработана комплексная система оценки обеспеченности технологическими ресурсами, основанная на коэффициенте достаточности:

$$K_{АТО} = \prod_{v=1}^3 K_{АТО}^v \tag{2}$$

где $K_{АТО}^v$ – парциальные коэффициенты для различных категорий оборудования.

Для каждой категории применяются специализированные вероятностные модели [3]:

Для экстренного восстановления (категория 1):

$$K_{АТО}^1 = 1 - P_{нев} \tag{3}$$

Для невозстанавливаемого оборудования (категория 2):

$$P(t) = (1 - e^{-\lambda t})^{n+1} \tag{4}$$

Для планового обновления (категория 3):

$$K_{АТО}^3 = e^{-\lambda t} \tag{5}$$

Интерпретация результатов осуществляется с использованием модифицированной шкалы Харрингтона (таблица 1):

Таблица 1 – Квалиметрическая шкала оценки достаточности технологического обеспечения.

Уровень обеспеченности	Диапазон значений $K_{АТО}$
Оптимальный	0,80-1,00
Достаточный	0,63-0,80
Приемлемый	0,37-0,63
Недостаточный	0,20-0,37
Критический	0,00-0,20

Моделирование процесса восстановления работоспособности основано на декомпозиции общего времени простоя:

$$T_B = t_0 + T_{пр} + t_n + t_y + t_y^{TO}, \tag{6}$$

где компоненты включают: время оповещения, время прибытия, диагностики, непосредственного восстановления и сопутствующих операций.

Рисунок 3 иллюстрирует вероятностную модель оценки риска невыполнения работ в установленные сроки. Модель основана на треугольном распределении времени выполнения работ с параметрами: минимальное (t_n), максимальное (t_k) и наиболее вероятное (t_u) время.

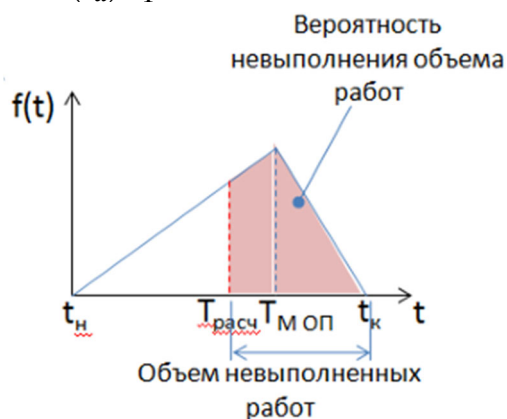


Рисунок 3 – Модель определения вероятности невыполнения работ.

Вероятность невыполнения работ оценивается по кусочно-заданной функции:

$$\begin{cases} 1 & \text{при } T_{расч} < t_u \\ 1 - \frac{(T_{расч} - t_u)^2}{(t_k - t_u)(t_M - t_u)} & \text{при } T_u \leq T_{расч} \leq t_M \\ 1 - \left(1 - \frac{(t_k - T_{расч})^2}{(t_k - t_u)(t_k - t_M)} \right) & \text{при } t_M \leq T_{расч} \leq t_k \\ 0 & \text{при } t_k < T_{расч} \end{cases} \tag{7}$$

Для решения задач оптимального распределения ограниченных ресурсов применен аппарат теории кооперативных игр [4]. Модель предполагает формирование коалиций участников для максимизации общей полезности при условии супераддитивности [5]:

$$v(S \cup T) \geq v(S) + v(T) \text{ при } S \cap T = \emptyset \tag{8}$$

Оценка рисков осуществляется с использованием модифицированной модели ALARP (As Low As Reasonably Practicable), предусматривающей четыре уровня риска (таблица 2):

Таблица 2 - Стратегия управления рисками по модели ALARP

Уровень риска	Стратегия управления
Неприемлемый	Обязательная немедленная нейтрализация
Нежелательный	Снижение при условии экономической целесообразности
Приемлемый	Контроль и мониторинг без активного вмешательства
Пренебрежимый	Принятие без дополнительных мер контроля

Таблица 3 содержит детализированные данные по распределению объектов инфраструктуры по уровням риска для различных дирекций ОАО "РЖД". Анализ данных показывает, что в среднем по сети 12% объектов относятся к категории неприемлемого риска, 7% - нежелательного, 6% - приемлемого и 75% - пренебрежимого.

Таблица 3 - Распределение объектов (станций и перегонов) на сети железных дорог по уровням риска потерь поездо-часов.

Дирекция инфраструктуры	Уровни риска потерь поездо-часов для станций (перегонов)							
	Недопустимый		Нежелательный		Допустимый		Не принимаемый в расчет	
	Количество объектов	Доля, %	Количество объектов	Доля, %	Количество объектов	Доля, %	Количество объектов	Доля, %
Октябрьская	176	12	103	7	81	6	1108	75
Калининградская	3	4	1	1	0	0	80	95
Московская	224	18	113	9	100	8	827	65
Горьковская	104	13	54	7	55	7	561	72
Северная	98	12	47	6	22	3	635	79
Северо-Кавказская	67	8	74	9	33	4	688	80
Юго-Восточная	39	7	24	4	21	4	469	85
Приволжская	75	14	54	10	30	6	370	70
Куйбышевская	26	3	25	3	5	1	742	93
Свердловская	98	11	89	10	64	7	663	73
Южно-Уральская	68	13	37	7	25	5	405	76
Западно-Сибирская	38	6	54	9	114	18	423	67
Красноярская	77	21	35	9	21	6	242	65
Восточно-Сибирская	67	14	31	6	36	7	351	72

Забайкальская	80	22	34	9	44	12	201	56
Дальневосточная	123	13	54	6	14	1	747	80
Сеть	1363	12	829	7	665	6	8472	75

Математическая постановка задачи минимизации бюджетных расходов [6]:

$$\begin{cases} R_{1,2}^{fi} \leq R_{1,2}^{Hi}, & \forall i = 1, \dots, n. \\ V_p^{\text{потр}} \rightarrow \min \end{cases} \quad (9)$$

Выбор оптимальных стратегий осуществляется на основе максиминного критерия:

$$W = \max_q \min_k Y_{qk}, \quad (10)$$

где Y_{qk} - функция выигрыша для стратегии C_q при реализации сценария k .

Заключение и перспективы внедрения

Разработанный комплекс методик и моделей позволяет осуществить переход от реактивной к предиктивной модели технического обслуживания. Внедрение предложенных решений обеспечивает снижение потерь в поезд-часах на 15-20%, оптимизацию затрат на закупку оборудования и повышение общей готовности систем ЖАТ.

Интеграция цифровых технологий (интернет вещей, большие данные, цифровые двойники) с методами оптимизации создает основу для адаптивного управления рисками и соответствует стратегическим направлениям цифровой трансформации ОАО "РЖД".

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: разработка интегрированной системы прескриптивной аналитики, создание когнитивных помощников для диспетчерского персонала и внедрение блокчейн-технологий для управления жизненным циклом оборудования.

Список литературы:

1. Соколов, М. М. Эксплуатационные основы железнодорожной автоматики и телемеханики : учебное пособие / М. М. Соколов. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2025. – 86 с. – ISBN 978-5-94941-359-3. – EDN DPVBVS.
2. Соколов, М. М. Основы железнодорожной автоматики и телемеханики на станциях / М. М. Соколов. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2024. – 77 с. – ISBN 978-5-94941-340-1. – EDN BLAFZK.
3. Горелик, А. В. Оценка влияния готовности объектов транспортной инфраструктуры ОАО "РЖД" на риски потерь для перевозочного процесса / А. В. Горелик, А. Н. Малых, А. В. Орлов // Надежность. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 53-56. – DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-4-53-56. – EDN AQFDPW.
4. Истомин, А. В. Теоретико-игровое управление рисками и выплатами на железнодорожном транспорте / А. В. Истомин, Е. В. Кузьмина // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2023. – № 5. – С. 9-21. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-05-2. – EDN OAWRWC.
5. Калайдин, Е. Н. Теория игр. Кооперативные игры / Е. Н. Калайдин. – Краснодар : Кубанский государственный университет, 2021. – 80 с. – ISBN 978-5-8209-1904-6. – EDN GUKUYV.
6. Об использовании теории игр при оптимизации процесса технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, А. В. Истомин,

Е. В. Кузьмина, А. Н. Малых // Наука и техника транспорта. – 2023. – № 1. – С. 19-28.
– EDN QEEKIF. 6. – EDN GUKUYV.

References:

1. Sokolov, M. M. Operational fundamentals of railway automation and telemechanics : a textbook / M. M. Sokolov. Omsk : Omsk State University of Railway Transport, 2025. 86 p. ISBN 978-5-94941-359-3. EDN DPVBVS.
2. Sokolov, M. M. Fundamentals of railway automation and telemechanics at stations / M. M. Sokolov. Omsk : Omsk State University of Railway Transport, 2024. 77 p. ISBN 978-5-94941-340-1. - EDN BLAFZK.
3. Gorelik, A.V. Assessment of the impact of the readiness of Russian Railways transport infrastructure facilities on the risks of losses for the transportation process / A.V. Gorelik, A. N. Malykh, A.V. Orlov // Reliability. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – pp. 53-56. – DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-4-53-56. – REGISTRATION number AQFDPW.
4. Istomin, A.V. Theoretical and game management of risks and payments in railway transport / A.V. Istomin, E. V. Kuzmina // Transport: science, technology, management. Scientific information collection. – 2023. – No. 5. – pp. 9-21. – DOI 10.36535/0236-1914-2023-05-2. – OAWRWC PUBLISHING HOUSE.
5. Kalaidin, E. N. Game theory. Cooperative games / E. N. Kalaidin. Krasnodar : Kuban State University, 2021. 80 p. ISBN 978-5-8209-1904-6. Edited by N. N. GUKUEV.
6. On the use of game theory in optimizing the process of technical operation of railway automation and telemechanics systems / A.V. Gorelik, A.V. Istomin, E. V. Kuzmina, A. N. Malykh // Science and Technology of transport. – 2023. – No. 1. – pp. 19-28. – EDN KIKIF. 6. – EDN GUKUIV.