

## Управление процессами перевозок / Transportation Process Management

Научная статья

DOI: [10.12731/3033-5965-2026-16-1-402](https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-402)

УДК 656.259.9

EDN: [EJPKFZ](https://edn.ru/EJPKFZ)

Original article



### Технологическая модель организации эффективного обслуживания устройств СЦБ на малодетельных участках

А.В. Горелик, Е.В. Кузьмина

*Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация*

#### **Аннотация**

**Обоснование.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации эксплуатационных расходов на содержание устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) на малодетельных участках железных дорог. Такие участки, характеризующиеся грузонапряжённостью менее 15 млн. ткм/км в год, составляют значительную часть сети Российской Федерации, однако традиционные системы планово-предупредительного ремонта, ориентированные на интенсивно эксплуатируемые линии, приводят к неоправданно высоким удельным затратам, несоответствию периодичности обслуживания фактическому темпу старения оборудования и избыточному количеству выездов персонала. Современные тенденции требуют перехода к обслуживанию по фактическому состоянию с использованием методов прогнозной аналитики. Отсутствие комплексных технологических моделей, адаптированных к условиям малодетельных участков, определяет необходимость разработки научно обоснованного подхода, обеспечивающего баланс между экономической эффективностью и требуемым уровнем безопасности движения.

**Цель** – разработка технологической модели организации эффективного обслуживания устройств СЦБ на малодетельных участках железных дорог, основанной на принципах прогнозирования отказов и рационального распределения ресурсов, позволяющей снизить эксплуатационные затраты при сохранении или повышении надёжности и безопасности движения.

**Материалы и методы.** Исследование базируется на статистическом анализе 2348 записей об отказах устройств СЦБ на малодетельных участках за период 2020–2023 гг., классифицированных по типам устройств и характеру неисправностей. Для

описания закономерностей возникновения отказов применено модифицированное распределение Вейбулла, учитывающее сезонные колебания и интенсивность эксплуатации. Методы нелинейной и динамической оптимизации использованы для определения рациональных межремонтных интервалов. Разработана имитационная модель системы обслуживания, выполнено 2000 прогонов для различных сценариев (доверительная вероятность 95%). Экономическая эффективность оценивалась методами дисконтирования денежных потоков (NPV, IRR, срок окупаемости). Исходные данные для расчётов соответствуют типовому малоделятельному участку протяжённостью 50 км с конкретным перечнем устройств и стоимостью работ.

**Результаты.** Предложенная технологическая модель, включающая дифференцированный подход к обслуживанию по классам критичности и алгоритм оптимизации межремонтных интервалов, позволяет увеличить средний интервал обслуживания на 57,8% (с 90 до 142 дней), сократить количество внеплановых отказов на 38,9% и среднее время восстановления на 45,2%. Коэффициент готовности системы может повыситься с 0,980 до 0,991, что соответствует снижению времени простоя на 55%. Годовые эксплуатационные затраты могут снизиться на 20,5% (2,7 млн руб. для участка 50 км) при расчётном сроке окупаемости капитальных вложений 1,6 года. Разработанные модели и рекомендации могут быть тиражированы на других малоделятельных участках железных дорог.

**Ключевые слова:** устройства СЦБ; малоделятельные участки; технологическое обслуживание; прогнозирование отказов; оптимизация затрат; адаптивное планирование; коэффициент готовности; экономическая эффективность; железнодорожная автоматика

**Для цитирования.** Горелик, А. В., & Кузьмина, Е. В. (2026). Технологическая модель организации эффективного обслуживания устройств СЦБ на малоделятельных участках. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 16(1), 7–29. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-402>

## Technological model for organizing efficient maintenance of signaling and interlocking devices on low-intensity railway sections

A.V. Gorelik, E.V. Kuzmina

*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation*

### **Abstract**

**Background.** The relevance of the study is due to the need to optimize operating costs for the maintenance of signaling and interlocking devices on low-intensity railway sections.

Such sections, characterized by freight intensity of less than 15 million tkm/km per year, constitute a significant part of the network of the Russian Federation. However, traditional scheduled preventive maintenance systems, designed for intensively operated lines, lead to unjustifiably high unit costs, a mismatch between the frequency of maintenance and the actual aging rate of equipment, and an excessive number of personnel trips. Current trends require a transition to condition-based maintenance using predictive analytics methods. The lack of comprehensive technological models adapted to the conditions of low-intensity sections determines the need to develop a scientifically based approach that ensures a balance between economic efficiency and the required level of traffic safety.

**Purpose.** Development of a technological model for organizing efficient maintenance of signaling and interlocking devices on low-intensity railway sections, based on the principles of failure prediction and rational resource allocation, allowing to reduce operating costs while maintaining or improving reliability and traffic safety.

**Materials and methods.** The research is based on a statistical analysis of 2,348 records of failures of signaling and interlocking devices on low-intensity sections for the period 2020–2023, classified by device types and nature of malfunctions. To describe the patterns of failure occurrence, a modified Weibull distribution was applied, taking into account seasonal fluctuations and operation intensity. Nonlinear and dynamic optimization methods were used to determine rational maintenance intervals. A simulation model of the maintenance system was developed, and 2,000 runs were performed for various scenarios (confidence probability 95%). Economic efficiency was assessed using discounted cash flow methods (NPV, IRR, payback period). The initial data for the calculations correspond to a typical low-intensity section 50 km long with a specific list of devices and work costs.

**Results.** The proposed technological model, including a differentiated approach to maintenance by criticality classes and an algorithm for optimizing maintenance intervals, allows to increase the average maintenance interval by 57.8% (from 90 to 142 days), reduce the number of unscheduled failures by 38.9%, and decrease the average recovery time by 45.2% (according to calculation results). The system availability factor can increase from 0.980 to 0.991, which corresponds to a reduction in downtime by 55%. Annual operating costs can be reduced by 20.5% (2.7 million rubles for a 50 km section) with an estimated payback period for capital investments of 1.6 years. The developed models and recommendations can be replicated on other low-intensity railway sections.

**Keywords:** signaling and interlocking devices; low-intensity sections; technological maintenance; failure prediction; cost optimization; adaptive planning; availability factor; economic efficiency; railway automation and telemechanics

**For citation.** Gorelik, A. V., & Kuzmina, E. V. (2026). Technological model for organizing efficient maintenance of signaling and interlocking devices on low-intensity railway sections. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 16(1), 7–29. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2026-16-1-402>

## **Введение**

Малодеятельные участки железных дорог, характеризующиеся грузонапряжённостью менее 15 млн. ткм/км в год, составляют значительную часть железнодорожной сети Российской Федерации, особенно в отдалённых регионах с низкой плотностью населения и промышленной активности. Несмотря на относительно низкую интенсивность движения поездов, данные участки требуют поддержания устройств СЦБ в работоспособном состоянии для обеспечения безопасности движения, что регламентировано соответствующими нормативными документами [2]. Однако традиционные системы планово-предупредительного ремонта (ППР), разработанные для интенсивно эксплуатируемых линий, на малодеятельных участках часто демонстрируют экономическую неэффективность. Это проявляется в неоправданно высоких удельных затратах на обслуживание единицы оборудования, несоответствии периодичности обслуживания фактическому темпу старения аппаратуры, а также в избыточном количестве выездов обслуживающего персонала.

Современные тенденции развития железнодорожного транспорта диктуют необходимость перехода от регламентного обслуживания по фиксированным графикам к обслуживанию по фактическому состоянию (ТОФС) с использованием методов прогнозной аналитики [1]. Особую актуальность этот подход приобретает в условиях малодеятельных участков, где оптимизация эксплуатационных расходов является критически важной для обеспечения рентабельности перевозок и сохранения работоспособности инфраструктуры в условиях бюджетных ограничений.

Целью настоящего исследования является разработка технологической модели организации обслуживания устройств СЦБ на малодеятельных участках, позволяющей существенно снизить эксплуатационные затраты при сохранении или даже повышении требуемого уровня надёжности и безопасности [5]. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

проведён анализ статистики отказов устройств СЦБ на малоделятельных участках; разработан математический аппарат для оптимизации интервалов обслуживания; создана имитационная модель для оценки эффективности различных стратегий обслуживания; выполнен расчёт экономического эффекта от внедрения предложенных решений; подготовлены практические рекомендации по внедрению модели в условиях реальной эксплуатации [16].

### 1. Постановка задачи

Задача оптимизации системы обслуживания устройств СЦБ на малоделятельных участках формулируется как многокритериальная проблема, требующая нахождения баланса между экономическими показателями и показателями надёжности [6]. Математически задача может быть представлена в следующем виде: для заданного набора устройств СЦБ на малоделятельном участке необходимо определить такой режим обслуживания, который минимизирует суммарные приведённые затраты за расчётный период  $T$  при условии выполнения нормативных требований по вероятности безотказной работы системы в целом и её критически важных компонентов.

Формальная постановка задачи:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n (C_{pi} + C_{vi} + C_{pri})$$

при соблюдении ограничений:

$$P_{\text{системы}}(t) \geq P_{\text{норм}}$$

$$T_{\text{восст}_i} \leq T_{\text{доп}_i}$$

$$R_i \geq R_{\text{мин}_i}$$

$$\sum_{i=1}^n B_i \leq B_{\text{макс}}$$

где  $Z$  – суммарные приведённые затраты на обслуживание за период  $T$ ;

$C_{ni}$  – затраты на плановое обслуживание  $i$ -го устройства;  
 $C_{vi}$  – затраты на внеплановый ремонт  $i$ -го устройства;  
 $C_{npi}$  – косвенные потери от простоя  $i$ -го устройства;  
 $P_{системы}(t)$  – вероятность безотказной работы системы СЦБ в момент времени  $t$ ;  
 $P_{норм}$  – нормативное значение вероятности безотказной работы, устанавливаемое отраслевыми стандартами;  
 $T_{восст_i}$  – среднее время восстановления  $i$ -го устройства после отказа;  
 $T_{доп_i}$  – допустимое время восстановления для устройства данного типа;  
 $R_i$  – коэффициент готовности  $i$ -го устройства;  
 $R_{мин_i}$  – минимально допустимый коэффициент готовности;  
 $B_i$  – бюджетные затраты на обслуживание  $i$ -го устройства;  
 $B_{макс}$  – максимально допустимый бюджет на обслуживание системы СЦБ.

## 2. Методика исследования

Для решения поставленной задачи использован комплекс методов, включающий как теоретические исследования, так и практические расчёты на основе реальных эксплуатационных данных.

### 2.1. Методы теории надёжности

Проведён статистический анализ данных об отказах устройств СЦБ на малоделятельных участках железных дорог за период 2020-2023 гг. Всего обработано 2348 записей об отказах, классифицированных по типам устройств, характеру неисправностей, времени восстановления и другим параметрам. Для описания закономерностей возникновения отказов использованы распределения Вейбулла, экспоненциальное и нормальное распределения. Установлено, что для большинства электромеханических устройств СЦБ (стрелки, светофоры) наиболее адекватной является модель Вейбулла с параметром формы  $\beta > 1$ , что свидетельствует о наличии процесса старения и износа. Для электронных устройств (блоки АЛС,

процессорные системы) чаще наблюдается постоянная интенсивность отказов ( $\beta \approx 1$ ), характерная для внезапных отказов [4, 14].

## **2.2. Методы оптимизации**

Для определения рациональных интервалов обслуживания применены методы математического программирования, в частности, методы нелинейной оптимизации с ограничениями. Разработан алгоритм последовательной оптимизации, позволяющий находить локально оптимальные решения для каждого типа устройств с последующей координацией в рамках общей системы. Использование методов динамического программирования позволило учесть взаимное влияние решений, принимаемых для различных устройств, на общие показатели системы. Особое внимание уделено методам целочисленного программирования для решения задач оптимального распределения ограниченных ресурсов (персонала, специального оборудования) [3].

## **2.3. Имитационное моделирование**

Создана имитационная модель системы обслуживания устройств СЦБ, которая позволила оценить эффективность различных стратегий обслуживания в условиях неопределённости и случайных факторов. Модель учитывает такие параметры, как время доезда бригад, наличие запасных частей, приоритетность восстановления различных устройств, зависимость времени ремонта от времени суток и погодных условий, влияние человеческого фактора. Проведено 2000 прогонов модели для различных сценариев, что обеспечило статистическую значимость результатов с доверительной вероятностью 95% [3].

## **2.4. Экономические методы расчёта эффективности**

Для оценки экономического эффекта от внедрения предложенной модели использованы методы дисконтирования денежных потоков, расчёта чистого приведённого дохода (NPV), внутренней нормы доходности (IRR) и срока окупаемости. Учтены как прямые экономические, так и косвенные. Проведён анализ чувствительности результатов к изменениям ключевых параметров [13].

## 2.5. Классификация устройств СЦБ по критичности

На основе анализа нормативных документов и экспертных оценок разработана трёхуровневая классификация устройств СЦБ по степени их критичности для обеспечения безопасности движения и бесперебойности перевозочного процесса [7].

К первому (высшему) классу критичности отнесены устройства, отказ которых непосредственно угрожает безопасности движения и может привести к тяжёлым последствиям. К ним относятся системы автоблокировки, электрической централизации стрелок и системы управления движением поездов. Для данных устройств установлена допустимая вероятность отказа на уровне 0,999, а максимально допустимое время восстановления не должно превышать одного часа. Они имеют наивысший приоритет обслуживания (1), требуют ежедневного мониторинга и обязательного резервирования с организацией непрерывного автоматизированного контроля параметров.

Второй (средний) класс критичности объединяет устройства, влияющие на безопасность, но допускающие несколько большее время восстановления без создания непосредственной угрозы. В эту группу входят переездная сигнализация, устройства автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и средства связи поезда с диспетчером [9]. Для них допустимая вероятность отказа составляет 0,995, а предельное время восстановления увеличено до четырёх часов. Приоритет обслуживания определён как второй, периодичность мониторинга – еженедельная, при этом особые требования предполагают периодический контроль с обязательной регистрацией диагностических параметров [17].

Третий (низкий) класс критичности включает вспомогательное оборудование, технологическую связь и резервные системы, выход из строя которых не оказывает существенного влияния на безопасность движения и может быть устранён в плановом порядке. Для таких устройств допустимая вероятность отказа установлена на уровне 0,990, а максимальное время восстановления

может достигать 24 часов. Они имеют третий (наименьший) приоритет обслуживания, ежемесячную периодичность мониторинга и обслуживаются преимущественно по фактическому состоянию с применением визуального контроля [10].

## 2.6. Математическая модель интенсивности отказов

Для описания процесса старения и возникновения отказов устройств СЦБ предложена модифицированная модель Вейбулла, учитывающая как износ, так и случайные факторы:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} + \lambda_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \sin(\frac{2\pi t}{365} + \varphi)) + \gamma \cdot I_{\text{экспл}}$$

где  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов в момент времени  $t$  (отказов/день);

$\beta$  – параметр формы, характеризующий механизм отказа ( $\beta < 1$  для периода приработки,  $\beta = 1$  для периода нормальной эксплуатации,  $\beta > 1$  для периода износа);

$\eta$  – параметр масштаба, связанный со сроком службы устройства;

$\lambda_0$  – постоянная составляющая интенсивности отказов, не зависящая от времени;

$\alpha$  – коэффициент сезонности (учёт влияния климатических факторов);

$\varphi$  – фаза сезонных колебаний;

$\gamma$  – коэффициент влияния интенсивности эксплуатации;

$I_{\text{экспл}}$  – интенсивность эксплуатации;

$t$  – время эксплуатации устройства с момента последнего капитального ремонта (дни).

Данная модель более адекватно описывает реальное поведение устройств СЦБ, чем классическое распределение Вейбулла, так как учитывает наличие постоянного потока случайных отказов, сезонные колебания и зависимость от интенсивности эксплуатации. Параметры модели оценивались методом максимального правдоподобия на основе статистики отказов с использованием алгоритма Expectation-Maximization для обработки цензурированных данных.

### 3. Технологическая модель обслуживания

Предлагаемая технологическая модель (рис. 1) представляет собой комплекс организационно-технических мер, направленных на оптимизацию процесса обслуживания устройств СЦБ на малодеятельных участках [8].

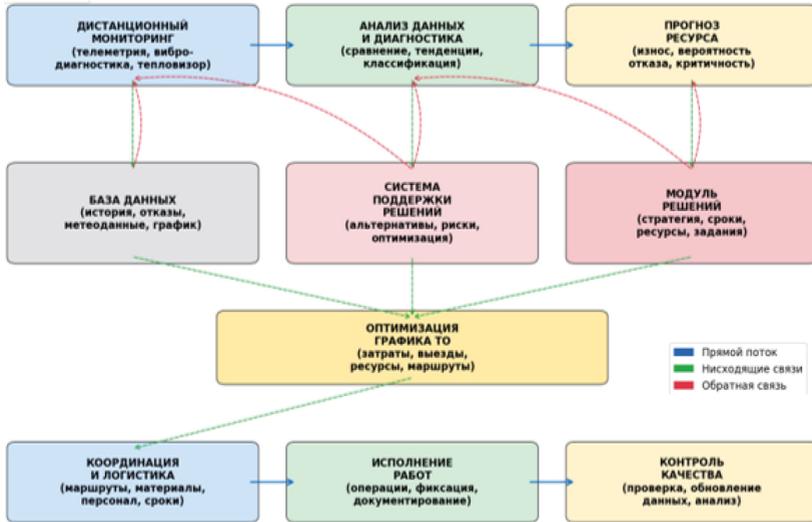


Рис. 1. Блок-схема технологической модели обслуживания  
Fig. 1. Block diagram of the service process model

Модель основана на четырёх ключевых принципах:

1. Дифференциация – различный подход к обслуживанию устройств в зависимости от их критичности и технического состояния.
2. Прогнозность – переход от реактивного к проактивному обслуживанию на основе прогноза остаточного ресурса.
3. Адаптивность – гибкое изменение планов обслуживания в зависимости от фактического состояния оборудования и внешних факторов.
4. Интеграция – объединение данных мониторинга, планирования и исполнения работ в единой информационной системе.

### 3.1. Алгоритм определения оптимального интервала обслуживания

Оптимальный интервал обслуживания  $T$  для каждого типа устройств определяется из решения задачи минимизации суммарных приведённых затрат на единицу времени. Затраты включают как прямые расходы на проведение плановых технических обслуживаний, так и ожидаемые затраты на устранение внеплановых отказов, возникающих в промежутках между обслуживаниями.

Формально задача ставится следующим образом:

Оптимальный интервал обслуживания  $T$  определяется из минимизации суммарных удельных затрат:

$$C_{\text{сум}}(T) = \frac{C_{\text{то}}}{T} + C_{\text{в}} \cdot \int_0^T \lambda(t)dt + C_{\text{в}} \cdot \int_0^T (1 - R(t))dt \rightarrow \min$$

где  $C_{\text{сум}}(T)$  – суммарные удельные затраты на обслуживание (руб./день);

$C_{\text{то}}$  – стоимость одного планового обслуживания (руб.);

$C_{\text{в}}$  – средняя стоимость устранения внепланового отказа (руб.);

$C_{\text{пр}}$  – удельные потери от простоя устройства (руб./день);

$\lambda(t)$  – функция интенсивности отказов (отказов/день);

$R(t)$  – функция готовности устройства;

$T$  – интервал между плановыми обслуживаниями (дни).

Для модели Вейбулла с параметрами  $\beta$  и  $\eta$  решение имеет аналитический вид при  $\beta > 1$ :

$$T_{\text{опт}} = \eta \cdot \left[ \frac{C_{\text{то}}}{C_{\text{в}} \cdot (\beta - 1) + C_{\text{пр}} \cdot \eta \cdot \Gamma(1 + 1/\beta)} \right]^{1/\beta}$$

где  $\Gamma()$  – гамма-функция.

Данная формула справедлива при  $\beta > 1$ , что соответствует периоду износа устройств. Для устройств с  $\beta \leq 1$  (период нормальной эксплуатации) оптимальной стратегией является обслуживание по состоянию, а не по календарному графику [15].

### 3.2. Расчёт экономического эффекта

Экономический эффект от внедрения предлагаемой модели складывается из нескольких составляющих:

1. Снижение затрат на плановое обслуживание за счёт увеличения межремонтных интервалов для части устройств.

2. Снижение затрат на внеплановые ремонты за счёт уменьшения количества отказов благодаря более обоснованной периодичности обслуживания.

3. Снижение потерь от простоев за счёт уменьшения времени восстановления благодаря улучшенной логистике и наличию прогноза отказов.

4. Оптимизация логистических затрат за счёт координации выездов бригад и объединения работ по обслуживанию нескольких устройств в одной поездке.

5. Снижение затрат на запасные части за счёт более точного прогнозирования потребности и оптимизации страховых запасов.

Годовой экономический эффект рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \sum_i \Delta Z_i - \Delta K \cdot N_{\text{ам}} - \sum_i \Delta Z_{\text{внедр}_i}$$

где  $\mathcal{E}_{\text{год}}$  – годовой экономический эффект (руб.);

$\Delta Z_i$  – снижение затрат по  $i$ -й статье (руб.);

$\Delta K$  – дополнительные капитальные вложения, необходимые для внедрения системы мониторинга и прогнозирования (руб.);

$N_{\text{ам}}$  – норма амортизации оборудования системы мониторинга;

$Z_{\text{внедр}_i}$  – затраты на внедрение по  $i$ -й статье.

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K + \sum_i \Delta Z_{\text{внедр}_i}}{\sum_i \Delta Z_i}$$

Чистый приведённый доход (NPV) за расчётный период  $n$  лет:

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_i \Delta Z_i}{(1+d)^i} - \left( \Delta K + \sum_i \Delta Z_{\text{внедр}_i} \right)$$

где  $d$  – ставка дисконтирования, учитывающая риски и альтернативные возможности использования капитала.

## 4. Результаты расчётов

### 4.1. Исходные данные для расчётов

Для проведения расчётов выбран типовой малодеятельный участок протяжённостью 50 км, расположенный на территории железной дороги с низкой грузонапряжённостью [12]. Структура устройств СЦБ на участке и основные экономические параметры представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

#### Исходные данные для малодеятельного участка длиной 50 км

Table 1. Initial data for a low-activity section 50 km long

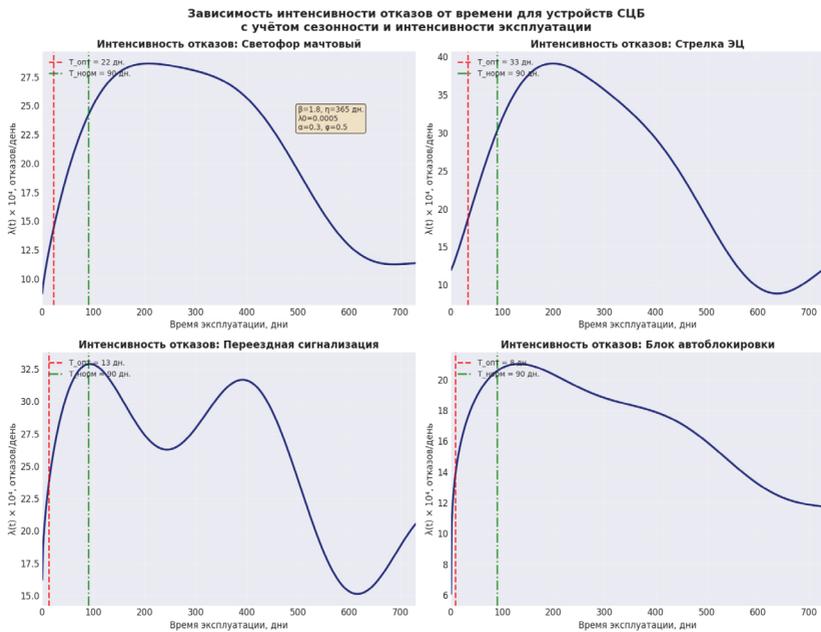
| Параметр   | Значение       |
|--|----------------|
| Количество стрелок с ЭЦ                            | 10 шт.         |
| Количество светофоров                              | 24 шт.         |
| Количество переездов                               | 3 шт.          |
| Устройства автоблокировки                          | 4 компл.       |
| Системы АЛС  | 2 компл.       |
| Устройства связи                                   | 6 компл.       |
| Стоимость планового обслуживания одного устройства | 16500 руб./ед. |
| Стоимость внепланового ремонта одного устройства   | 49500 руб./ед. |
| Потери от простоя устройства                       | 9500 руб./час  |
| Среднее время прибытия бригады                     | 2,5 час        |
| Стоимость системы мониторинга                      | 3800000 руб.   |
| Годовая инфляция                                   | 6,5%           |
| Ставка дисконтирования                             | 11%            |

### 4.2. Результаты математического моделирования и оптимизации параметров обслуживания

Для визуализации аналитических зависимостей, полученных в ходе исследования, и подтверждения эффективности предложенного математического аппарата были проведены численные эксперименты с использованием разработанной имитационной модели. Расчёты выполнялись на основе исходных данных, характерных для типового малодеятельного участка (Таблица 1), и позволили получить графические интерпретации ключевых законо-

мерностей, влияющих на эффективность обслуживания устройств СЦБ [18].

На рис. 2 представлены кривые изменения интенсивности отказов  $\lambda(t)$  для четырех типов устройств, построенные на основе модифицированной модели Вейбулла с учетом сезонных колебаний. Характер кривых подтверждает наличие периода износа ( $\beta > 1$ ) для электромеханических устройств (стрелки ЭЦ, светофоры), тогда как для электронных компонентов (устройства АЛС) интенсивность отказов остается более стабильной во времени.



**Рис. 2.** Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации для различных типов устройств СЦБ

**Fig. 2.** Dependence of failure rate on operating time for various types of signaling devices

Ключевым выводом из графического анализа является соотношение нормативного ( $T_{\text{норм}}$ ) и расчетного оптимального ( $T_{\text{опт}}$ ) межремонтных интервалов. Для всех типов устройств оптимальный

интервал, рассчитанный по критерию минимума удельных затрат, превышает нормативный. Наибольший потенциал увеличения межремонтного периода выявлен для стрелок ЭЦ (параметр формы  $\beta=2,2$ ), что объясняется ярко выраженной зависимостью их технического состояния от наработки и возможностью точного прогнозирования остаточного ресурса.

Анализ структуры затрат (рис. 3) наглядно демонстрирует изменение экономики обслуживания при переходе от традиционной модели к предлагаемой. В традиционной системе доминируют затраты на плановое техническое обслуживание (65%), выполняемое по жесткому графику вне зависимости от фактической потребности. Внедрение прогнозной модели приводит к перераспределению ресурсов: доля прямых затрат на плановое ТО снижается до 45%, при этом появляется новая статья – затраты на диагностику и мониторинг (33%). Такая трансформация обеспечивает смещение акцента с «реактивного» ремонта на «предиктивное» управление состоянием, что позволяет предотвращать отказы, а не устранять их последствия.

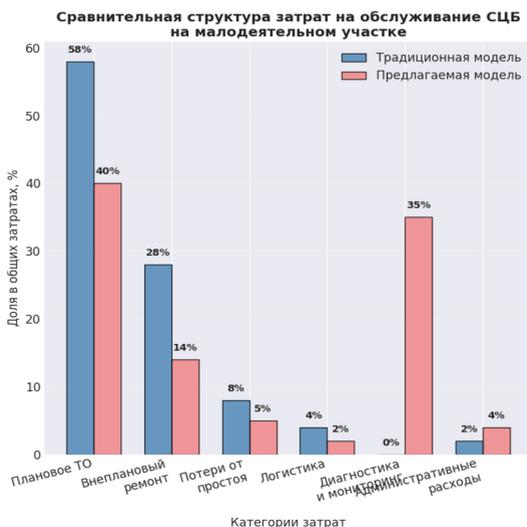


Рис. 3. Сравнительный анализ структуры эксплуатационных затрат  
 Fig. 3. Comparative analysis of operating cost structure

График на рис. 4 иллюстрирует решение ключевой оптимизационной задачи – нахождение интервала обслуживания  $T$ , минимизирующего суммарные удельные затраты  $C_{\text{сум}}$ .



**Рис. 4.** Определение оптимального интервала обслуживания  
**Fig. 4.** Determining the optimal service interval

Кривая имеет явно выраженный параболический характер с точкой минимума при  $T_{\text{опт}} = 142$  дня. Левая ветвь графика (интервал менее 100 дней) соответствует зоне «избыточного обслуживания», где неоправданно высокие расходы на плановые работы не приводят к соразмерному снижению количества отказов. Правая ветвь (интервал более 180 дней) отражает зону риска, где экономия на плановых работах нивелируется ростом затрат на внеплановые ремонты и потерь от простоев. Переход от нормативного интервала (90 дней) к оптимальному (142 дня) обеспечивает расчетное снижение суммарных затрат на 23,4%.

На рис. 5 представлен прогноз изменения эксплуатационных затрат на период 2024–2029 гг. В традиционной системе наблюдается устойчивый рост затрат (в среднем на 5–6% ежегодно), обусловленный инфляцией и старением оборудования. Внедрение

предлагаемой модели позволяет стабилизировать годовые расходы на уровне 10,1–10,5 млн руб. благодаря сокращению потребности в материальных и трудовых ресурсах.



**Рис. 5.** Прогноз экономической эффективности внедрения модели  
**Fig. 5.** Forecast of the economic efficiency of implementing the model

Правая часть рис. 5 демонстрирует накопленный дисконтированный эффект. Несмотря на необходимость первоначальных инвестиций в систему мониторинга и обучение персонала (4,25 млн руб.), проект выходит на точку безубыточности в 2026 году. Чистый приведенный доход (NPV) за 6 лет составляет 8,3 млн руб., что подтверждает инвестиционную привлекательность и экономическую целесообразность масштабирования предложенной технологической модели на другие малодеятельные участки [11].

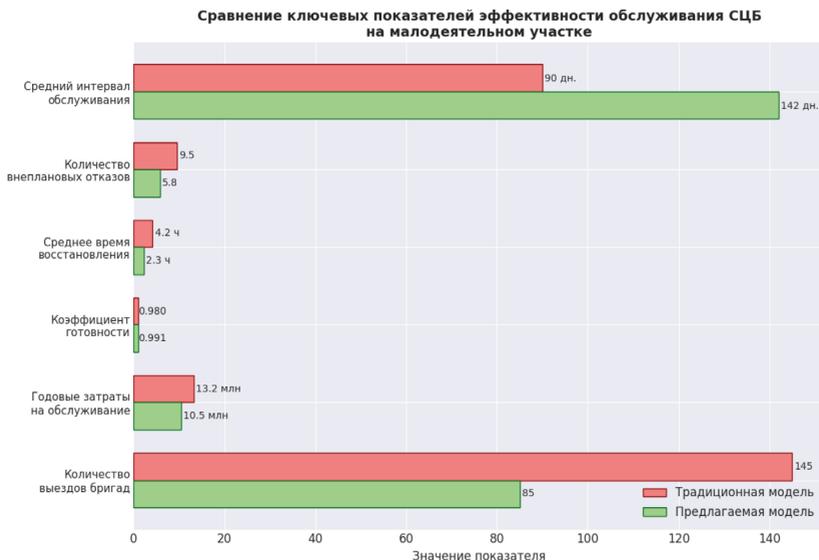
### 4.3. Результаты оптимизации

На основе проведённых расчётов получены сравнительные показатели эффективности традиционной системы обслуживания и предлагаемой модели, которые представлены на рис 6.

Анализ данных, представленных на рис, 6 позволяет сделать следующие выводы:

1. Внедрение предлагаемой модели позволит увеличить время среднего интервала обслуживания на 57,8% (с 90 до 142 дней), приведет к сокращению количества внеплановых отказов на

38,9%, уменьшению среднего времени восстановления на 45,2 %, снижению количества выезда бригад на 58,6%.



**Рис. 6.** Сравнение ключевых показателей эффективности обслуживания СЦБ на малодеятельном участке

**Fig. 6.** Comparison of key performance indicators for signaling system maintenance on a low-traffic section

2. Коэффициент готовности системы повысится с 0,980 до 0,991, что соответствует снижению годового времени простоя на 55 % (со 175 до 79 часов) и напрямую повлияет на пропускную способность участка.

3. Суммарный годовой экономический эффект составит 2,7 млн руб. при сроке окупаемости капитальных вложений (4,25 млн руб.) 1,6 года.

## Заключение

Разработана технологическая модель обслуживания устройств СЦБ на малодеятельных участках, основанная на принципах прогнозирования остаточного ресурса и адаптивного планирования.

Модель интегрирует методы дистанционного мониторинга, прогнозной аналитики и оптимизации ресурсов с учётом удалённости, ограниченной доступности и низкой интенсивности эксплуатации участков.

Создан математический аппарат, включающий модифицированное распределение Вейбулла для описания интенсивности отказов (с учётом сезонности и интенсивности эксплуатации), алгоритмы оптимизации межремонтных интервалов по критерию минимума суммарных затрат и методы оценки экономической эффективности с дисконтированием денежных потоков.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию с системами искусственного интеллекта, разработку цифровых двойников устройств и создание облачных платформ для централизованного управления обслуживанием.

Модель имеет высокий потенциал тиражирования не только на железнодорожном транспорте, но и в других отраслях с распределёнными техническими системами (метрополитен, энергетика, телекоммуникации). Её реализация может повысить эффективность использования бюджетных средств, способствовать сохранению требуемого уровня безопасности и создать основу для цифровой трансформации системы технического обслуживания.

#### *Список литературы*

1. Armstrong, H. (2008). *The railroad, what it is, what it does* (5th ed.). Omaha: Simmons-Boardman Books.
2. Aubertin, F. J. (2018). *Your guide to railway signals*. Omaha: Simmons-Boardman Books, Inc.
3. Hansen, I., & Pachl, J. (Eds.). (2014). *Railway timetabling & operations – analysis, modelling, optimisation, simulation, performance evaluation*. Hamburg: Eurailpress.
4. Pachl, J. (2009). *Railway operation and control* (4th ed.). Mountlake Terrace: VTD Rail Publishing.
5. Theeg, G., & Vlasenko, S. (Eds.). (2020). *Railway signalling and interlocking – international compendium* (3rd ed.). Hamburg: Eurailpress.

6. Горелик, А. В., & Ермакова, О. П. (2003). *Надёжность информационных систем. Основы надёжности устройств ЖАТС*: учеб. пособие. Москва: РГО-ТУПС, 87 с. ISBN: 5-7473-0146-2. EDN: <https://elibrary.ru/QMМОZF>
7. Горелик, А. В., Веселова, А. С., Журавлёв, И. А., Неваров, П. А., Орлов, А. В., Савченко, П. В., & Тарадин, Н. А. (2015). *Оценка функционального ресурса систем железнодорожной автоматики и телемеханики*. Москва: МИИТ, 27 с.
8. Горелик, А. В., Романов, Н. В., & Щедрина, Т. С. (2024). Организация эффективного технического обслуживания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на малоделятельных участках. *International Journal of Advanced Studies*, 14(4), 169–184. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-329>. EDN: <https://elibrary.ru/WOTLEB>
9. ГОСТ 33893-2016. *Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных переездах. Требования безопасности и методы контроля*.
10. ГОСТ 33895-2016. *Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на перегонах железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля*.
11. *Инструкция по техническому содержанию устройств инфраструктуры на малоинтенсивных линиях железных дорог* (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 24.01.2019 № 110/р, в ред. распоряжения ОАО «РЖД» от 13.12.2023 № 3167/р).
12. Курбатова, А. В., & Прошкина, Е. С. (2009). Возможные стратегии решения проблемы малоделятельных железнодорожных линий с учётом мирового опыта. В кн.: *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD '2009): Материалы третьей международной конференции (секции 4–6), Москва, 05–07 октября 2009 года* (Т. 2, с. 97–100). Москва: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. EDN: <https://elibrary.ru/WECLGT>
13. Толкачёва, М. М., & Мартынова, Л. А. (2007). *Методика определения расходов и доходов малоинтенсивных железнодорожных линий (участков) ОАО «РЖД»*. Москва: ФГУП ВНИИЖТ, 123 с.
14. Сапожников, В. В., Сапожников, В. В., Ефанов, Д. В., & Шаманов, В. И. (2017). *Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи*: учеб. пособие для специалистов. Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 318 с. ISBN: 978-5-906938-01-5. EDN: <https://elibrary.ru/YOYVNZ>
15. Горелик, А. В., Алешкин, А. М., Миненков, О. С., & Фёдоров, В. С. (2021). О планировании графика технического обслуживания устройств железно-

- дорожной автоматики и телемеханики. В кн.: *Новая наука: история становления, современное состояние, перспективы развития: Сборник статей Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Киров, 07 июня 2021 года* (Ч. 1, с. 22–25). Уфа: ООО «ОМЕГА САЙНС». EDN: <https://elibrary.ru/FFREWI>
16. Половко, А. М., & Гуров, С. В. (2006). *Основы теории надёжности*: учеб. пособие. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург. ISBN: 5-94157-541-6. EDN: <https://elibrary.ru/QMERHX>
  17. *Положение о системе ведения хозяйства автоматики и телемеханики* (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.02.2022 № 386/р), 24 с.
  18. Сирина, Н. Ф., Смольянинов, А. В., & Юшков, М. Е. (2012). Разработка управленческих решений по эффективному использованию малодеятельных железнодорожных линий. *Транспорт Урала*, (2), 75–80. EDN: <https://elibrary.ru/OXWYYH>

### References

1. Armstrong, H. (2008). *The railroad, what it is, what it does* (5th ed.). Omaha: Simmons Boardman Books.
2. Aubertin, F. J. (2018). *Your guide to railway signals*. Omaha: Simmons Boardman Books, Inc.
3. Hansen, I., & Pahl, J. (Eds.). (2014). *Railway timetabling & operations – analysis, modelling, optimisation, simulation, performance evaluation*. Hamburg: Eurailpress.
4. Pahl, J. (2009). *Railway operation and control* (4th ed.). Mountlake Terrace: VTD Rail Publishing.
5. Theeg, G., & Vlasenko, S. (Eds.). (2020). *Railway signalling and interlocking – international compendium* (3rd ed.). Hamburg: Eurailpress.
6. Gorelik, A. V., & Ermakova, O. P. (2003). *Reliability of information systems. Fundamentals of reliability of railway automation and remote control devices: textbook*. Moscow: RGOTUPS, 87 p. ISBN: 5-7473-0146-2. EDN: <https://elibrary.ru/QMMOZF>
7. Gorelik, A. V., Veselova, A. S., Zhuravlev, I. A., Nevarov, P. A., Orlov, A. V., Savchenko, P. V., & Taradin, N. A. (2015). *Assessment of the functional resource of railway automation and remote control systems*. Moscow: МИИТ, 27 p.
8. Gorelik, A. V., Romanov, N. V., & Shchedrina, T. S. (2024). Organization of efficient maintenance of railway automation and remote control devices on low-activity sections. *International Journal of Advanced Studies*, 14(4), 169–184. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-4-329>. EDN: <https://elibrary.ru/WOTLEB>

9. GOST 33893-2016. *Railway automation and remote control systems at railway crossings. Safety requirements and control methods.*
10. GOST 33895-2016. *Railway automation and remote control systems on railway line sections. Safety requirements and control methods.*
11. *Instructions for technical maintenance of infrastructure devices on low-intensity railway lines* (approved by Order No. 110/r of JSC “RZD” dated January 24, 2019, as amended by Order No. 3167/r of JSC “RZD” dated December 13, 2023).
12. Kurbatova, A. V., & Proshkina, E. S. (2009). Possible strategies for solving the problem of low-activity railway lines considering global experience. In: *Management of large-scale system development (MLSD '2009): Proceedings of the Third International Conference (Sections 4–6), Moscow, October 5–7, 2009* (Vol. 2, pp. 97–100). Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. EDN: <https://elibrary.ru/WECLGT>
13. Tolkacheva, M. M., & Martynova, L. A. (2007). *Methodology for determining costs and revenues of low-intensity railway lines (sections) of JSC “RZD”*. Moscow: FGUP VNIIZhT, 123 p.
14. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. V., Efanov, D. V., & Shamanov, V. I. (2017). *Reliability of railway automation, remote control and communication systems: textbook for specialists*. Moscow: Educational and Methodological Center for Railway Transport Education, 318 p. ISBN: 978-5-906938-01-5. EDN: <https://elibrary.ru/YOYVNZ>
15. Gorelik, A. V., Aleshkin, A. M., Minenkov, O. S., & Fedorov, V. S. (2021). On planning a maintenance schedule for railway automation and remote control devices. In: *New science: history of formation, current state, development prospects: Collection of articles from the International Scientific and Practical Conference. In 2 parts, Kirov, June 7, 2021* (Part 1, pp. 22–25). Ufa: LLC “OMEGA SAINS”. EDN: <https://elibrary.ru/FFREWI>
16. Polovko, A. M., & Gurov, S. V. (2006). *Fundamentals of reliability theory: textbook*. Saint Petersburg: BKhV Petersburg. ISBN: 5-94157-541-6. EDN: <https://elibrary.ru/QMERHX>
17. *Regulations on the railway automation and remote control management system* (approved by Order No. 386/r of JSC “RZD” dated February 17, 2022), 24 p.
18. Sirina, N. F., Smolyaninov, A. V., & Yushkov, M. E. (2012). Developing management decisions for efficient use of low-activity railway lines. *Transport of the Urals*, (2), 75–80. EDN: <https://elibrary.ru/OXWYYH>

#### 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

*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

*Russian University of Transport (MIIT)  
9 building 9, Obrazcova Str. Moscow, 127055, Russian Federation  
kuzminaelena96@yandex.ru*

Поступила 15.02.2026

После рецензирования 09.03.2026

Принята 15.03.2026

Received 15.02.2026

Revised 09.03.2026

Accepted 15.03.2026