Вестник Череповецкого государственного университета, 2026, № 5 (134), с. 18–30.
Cherepovets State University Bulletin, 2026, no. 5 (134), pp. 18–30.

Научная статья
УДК 656.25
https://doi.org/10.23859/1994-0637-2026-5-134-2
https://elibrary.ru/wgwplp

Дискретно-событийная модель обоснования проектных и эксплуатационных параметров систем ЖАТ по критерию готовности

Елена Витальевна Кузьмина
Российский университет транспорта (МИИТ),
Москва, Россия
kuzminaelena96@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-1837-7989

Аннотация. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) требуют количественной оценки коэффициента готовности $K_г$ с учетом сложной структуры, неэкспоненциальных распределений наработки до отказа и времени восстановления, ограниченных ресурсов ремонта и периодического технического обслуживания. В статье разработана имитационная дискретно-событийная модель, воспроизводящая указанные факторы. Верификация модели на аналитических решениях для марковских и полумарковских процессов показала совпадение в пределах 95 % доверительных интервалов (максимальное расхождение 0,0002). Для типовой системы управления стрелкой установлены оптимальные параметры: 2–3 ремонтные бригады; 2 комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей; период технического обслуживания не менее 336 ч. Модель рекомендуется для проектных и эксплуатационных подразделений.

Ключевые слова: коэффициент готовности, системы ЖАТ, имитационное моделирование, марковские процессы, полумарковские процессы, резервирование, ЗИП, ТО, надежность

Для цитирования: Кузьмина Е. В. Дискретно-событийная модель обоснования проектных и эксплуатационных параметров систем ЖАТ по критерию готовности**.** *Вестник Череповецкого государственного университета*, 2026, № 5 (134), с. 18–30. https://doi.org/10.23859/1994-0637-2026-5-134-2; EDN: WGWPLP

Discrete-event model for justification of design and operational parameters of railway signalling and telecommunication systems based on the availability criterion

Elena V. Kuzmina
Russian University of Transport (MIIT),
Moscow, Russia
kuzminaelena96@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-1837-7989

Abstract. Systems of railway automation and telemechanics (RAT) require a quantitative assessment of the availability factor Kg taking into account complex structure, non-exponential distributions of time to failure and repair time, limited repair resources, and periodic maintenance. A discrete-event simulation model has been developed that reproduces these factors. Verification of the model against

© Кузьмина Е. В., 2026

analytical solutions for Markov and semi-Markov processes showed agreement within 95 % confidence intervals (maximum deviation 0.0002). For a typical point control system, optimal parameters have been established: 2–3 repair teams, 2 sets of spare parts, and a maintenance period of at least 336 hours. The model is recommended for design and operational departments.
Keywords: availability, RAT systems, simulation modelling, Markov processes, semi-Markov processes, redundancy, spare parts inventory, maintenance, reliability
For citation: Kuzmina E. V. Discrete-event model for justification of design and operational parameters of railway signalling and telecommunication systems based on the availability criterion. *Cherepovets State University Bulletin*, 2026, no. 5 (134), pp. 18–30. (In Russ.) https://doi.org/10.23859/1994-0637-2026-5-134-2; EDN: WGWPLP

Введение

Системы железнодорожной автоматики и телемеханики (далее – ЖАТ) относятся к классу технических систем, отказ которых может привести к значительным экономическим потерям и угрозе безопасности движения поездов[1]. При эксплуатации станций ключевым показателем эффективности является коэффициент готовности $K_г$ – вероятность того, что система окажется работоспособной в произвольный момент времени в установившемся режиме эксплуатации[2].

Коэффициент готовности аналитически выражается через среднюю наработку на отказ T_0 и среднее время восстановления $T_в$: $K_г = \frac{T_0}{T_0 + T_в}$ [3].

Классические аналитические методы расчета $K_г$ хорошо развиты для систем с простой структурой и экспоненциальными распределениями наработки до отказа и времени восстановления[4]. Однако реальные системы ЖАТ характеризуются:

– иерархической структурой с различными видами резервирования;

– неэкспоненциальными распределениями (Вейбулла, гамма, логнормальное), обусловленными процессами старения и восстановления;

– ограниченными ресурсами восстановления;

– периодическим техническим обслуживанием, изменяющим интенсивность отказов[5].

[1] Веселова А. С. *Оценка качества технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики*: дис. … канд. техн. наук. Москва: [б. и.], 2020. 270 с. EDN: DLDIGJ

[2] Сапожников В. В., Сапожников В. В., Ефанов Д. В. *Основы теории надежности и технической диагностики*. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 588 с. EDN: IZBJPZ

[3] Рябинин И. А. *Надежность и безопасность структурно-сложных систем*. Санкт-Петербург: Политехника, Издательство Санкт-Петербургского университета, 2012. 277 с. EDN: RYRPPV

[4] Бурсиан Е. Ю., Проурзин В. А., Проурзин О. В. Сравнительный анализ методов оценки надежности по большим данным эксплуатации сложных систем. *Надежность*, 2023, т. 23, № 4, с. 25–30. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-25-30; EDN: WWHHYY

[5] Садовникова Н. П., Парыгин Д. С., Ерещенко Т. В., Рашевский Н. М. *Имитационное моделирование*. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. 128 с. EDN: IVSWCJ

В таких условиях аналитическое описание становится чрезмерно сложным, а часто и невозможным без существенных упрощений[1]. Альтернативой является имитационное моделирование, позволяющее учесть перечисленные факторы и получить статистически достоверные оценки[2].

Наша цель – разработка имитационной модели, пригодной для оценки коэффициента готовности систем ЖАТ, с расширенным математическим обоснованием и возможностью учета широкого спектра эксплуатационных факторов.

Основная часть

Аналитическая база для верификации

Для верификации имитационной модели использованы аналитические выражения, полученные в рамках теории марковских и полумарковских процессов[3]. Рассмотрены пять типов структур, наиболее часто встречающихся в системах ЖАТ, а также учтены эффекты многоканального восстановления и ограниченного количества запасных частей, инструментов и принадлежностей (далее – ЗИП)[4].

$$\begin{cases} \dot{P}_0 = -n\lambda P_0 + \mu P_1, \\ \dot{P}_i = -(n-i)\lambda P_i - i\mu P_i + (n-i+1)\lambda P_{i-1} + (i+1)\mu P_{i+1}, \ 1 \le i \le n-m, \\ \dot{P}_{n-m+1} = -(n-m+i)\mu P_{n-m+1} + (m-1)\lambda P_{n-m}, \end{cases} \quad (1)$$

Пусть система состоит из n одинаковых элементов, для работоспособности достаточно m исправных ($m \le n$)[5]. Интенсивность отказов одного элемента λ_i, интенсивность восстановления μ. Восстановление ведется без ограничений, ремонтный орган один[6]. Состояние системы определяется числом отказавших элементов $i = 0, 1, \ldots, n-m+1$ (при $i > n - m$ система неработоспособна). Процесс является

[1] Константинова Т. Ю., Лыков А. А., Марков Д. С., Наседкин О. А., Соколов В. Б. Технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики. *Автоматика на транспорте*, 2023, № 2, с. 193–204. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204; EDN: HYPJQU

[2] Шмидт О. О. *Обобщенная модель процесса восстановления в теории надежности использования информационных технологий*: дис. … канд. физ.-мат. наук. Красноярск: [б. и.], 2008. 125 с. EDN: NQDJUD

[3] Родионов И. В. *Вероятностный и статистический анализ экстремумов дискретных стохастических систем*: дис. … д-р физ.-мат. наук. Москва: [б. и.], 2021. 259 с. EDN: IPSWQR

[4] Хромушкин К. Д. *Управление надежностью устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на всех этапах их жизненного цикла*: дис. … канд. техн. наук. Серпухов: [б. и.], 2011. 140 с. EDN: QFIRAD

[5] Журавлев И. А. *Модели и методы оценки показателей надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики*: дис. … канд. техн. наук. Москва: [б. и.], 2013. 236 с. EDN: SUSQWP

[6] Посеренин С. П. *Теоретические основы стратегий технического обслуживания машин и технологического оборудования*: дис. … д-р техн. наук. Москва: [б. и.], 2005. 381 с. EDN: NNPVRP

марковским, система дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний $P_i(t)$ имеет вид:

с условием $\sum_{i=0}^{n-m+1} P_i = 1$. В стационарном режиме $\left(\dot{P}_i = 0\right)$ решение дает:

$$P_i = P_0 \cdot \frac{(n\lambda)^i}{i!\mu^i},\ i = 0,1,...,\ n-m+1, \tag{2}$$

где $P_0 = \left[\sum_{i=0}^{n-m+1} \frac{(n\lambda)^i}{i!\mu^i}\right]^{-1}$.

Коэффициент готовности может быть рассчитан по формуле:

$$K_г = \sum_{i=0}^{n-m} P_i = \frac{\sum_{i=0}^{n-m} \frac{(n\lambda)^i}{i!\mu^i}}{\sum_{i=0}^{n-m+1} \frac{(n\lambda)^i}{i!\mu^i}}. \tag{3}$$

Рассмотрим систему из одного основного и r резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме. Интенсивность отказа основного элемента λ_0, резервного в нагруженном состоянии λ_1 (при вводе в работу). Интенсивность восстановления μ. Состояния: j – число отказавших элементов (от 0 до $r + 1$, где $r + 1$ – состояние полной неработоспособности). Система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{P}_0 = -\lambda_0 P_0 + \mu P_1, \\ \dot{P}_j = -\left[\lambda_0 + (j-1)\lambda_1 - (j-1)\mu\right] \cdot P_j + \lambda_0 P_{j-1} + j\mu P_{j+1},\ 1 \le j \le r, \\ \dot{P}_{r+1} = -(r+1)\mu P_{r+1} + (\lambda_0 + r\lambda_1) P_r. \end{cases} \tag{4}$$

Стационарное решение для случая $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda$:

$$P_j = P_0 \cdot \frac{\lambda^j}{j!\mu^j} \prod_{k=1}^{j-1} (r+1-k),\ j = 1, ..., r+1, \tag{5}$$

$$K_г = 1 - P_{r+1}. \tag{6}$$

В системах ЖАТ часто применяется автоматическое переключение на резерв. Надежность переключателя существенно влияет на общий коэффициент готовности. Рассмотрим систему с одним основным каналом, одним резервным и переключателем, который может отказать в режиме ожидания и при переключении. Интенсивность отказов переключателя – λ_s, интенсивность восстановления – μ_s. Для упрощения примем, что переключатель при отказе приводит к неработоспособности системы, а его восстановление происходит независимо. Состояния системы описы-

ваются комбинацией состояний каналов и переключателя. Марковский процесс имеет 6 состояний. Аналитическое выражение для $K_г$ имеет вид[1]:

$$K_г = \frac{\mu\mu_s(\lambda+\mu s)}{(\lambda+\mu)(\lambda_s+\mu_s)\mu+\lambda\lambda_s\mu_s+\lambda\mu\mu_s+\lambda\lambda_s\mu}. \quad (7)$$

При наличии нескольких ремонтных бригад процесс становится многомерным марковским[2]. Для системы «2 из 3» с двумя ремонтными органами стационарные вероятности состояний P_i (i – число отказавших элементов) определяются из уравнений:

$$\begin{cases} P_1 = \dfrac{3\lambda}{\mu}P_0, \\ P_2 = \dfrac{3\lambda}{\mu}P_1 = \dfrac{9\lambda^2}{\mu^2}P_0, \\ P_3 = \dfrac{\lambda}{2\mu}P_2 = \dfrac{9\lambda^3}{2\mu^3}P_0, \end{cases} \quad (8)$$

где $P_0 = \left[1+\dfrac{3\lambda}{\mu}+\dfrac{9\lambda^2}{\mu^2}+\dfrac{9\lambda^3}{2\mu^3}\right]^{-1}$. Коэффициент готовности $K_г = 1 - P_3$.

При ограниченном ЗИП процесс восстановления становится процессом с истощением ресурса. Для системы из одного элемента с s запасными частями и одним ремонтным органом, где время пополнения запаса распределено экспоненциально с параметром μ, а интенсивность отказов λ, стационарная готовность описывается формулой Эрланга для системы с ожиданием:

$$K_г = 1-\frac{(\lambda/\mu)^{(s+1)}}{(s+1)!}\left[\sum_{k=0}^{s+1}\frac{(\lambda/\mu)^k}{k!}\right]^{(-1)}. \quad (9)$$

Более сложные структуры требуют имитационного моделирования.

Более точный расчет требует учета случайности моментов отказов относительно цикла ТО.

Имитационная модель

Разработанная имитационная модель построена на основе дискретно-событийного подхода. Ее основные возможности:

[1] *СТО РЖД 19.002-2017. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики*. Москва: Стандартинформ, 2017. 16 с.

[2] Привалов А. Е., Дорожко И. В., Захарова Е. А., Копейка А. Л. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования. *Труды МАИ*, 2018, № 103, с. 28. EDN: VUAPGJ

– топология системы: граф элементов с указанием логики работы (последовательное, параллельное, резервирование с переключением)[1]; поддерживаются иерархические структуры;

– законы распределения: для наработки до отказа – экспоненциальное, Вейбулла (с параметром формы β), гамма, логнормальное; для времени восстановления – экспоненциальное, гамма, нормальное (усеченное);

– ресурсы восстановления: количество ремонтных бригад, приоритеты;

– запасные части: ограниченный запас ЗИП с возможностью пополнения;

– техническое обслуживание (далее – ТО): периодическое ТО с заданным интервалом и длительностью (возможно назначение ТО для отдельных элементов или всей системы);

– учет старения: возможность задания возрастающей интенсивности отказов.

Для каждого прогона модели формируется календарь событий, который имеет основные шаги[2].

1. Инициализация: задание начальных состояний элементов (исправны), резервирование ЗИП, установка времени следующего ТО.

2. Генерация начальных времен отказов: для каждого элемента.

3. Цикл по времени: пока $t < T_{\text{sim}}$:

a) определение ближайшего события (отказ, восстановление, начало / окончание ТО);

b) продвижение времени;

c) обработка события:

– отказ – если элемент не в резерве, проверяется возможность замещения (при наличии резерва и свободной бригады / ЗИП – начало восстановления, иначе – ожидание; при переходе системы в неработоспособное состояние фиксируется начало простоя);

– восстановление – элемент возвращается в строй, освобождается бригада, пополняется ЗИП (если система была в неработоспособном состоянии и становится работоспособной, то фиксируется окончание простоя);

– ТО – элемент (система) выводится из работы, затем возвращается.

4. Завершение прогона: вычисляется накопленное время простоя – $_{\text{down}}$ и коэффициент готовности $K_{\text{г}} = 1 - t_{\text{down}} / T_{\text{sim}}$.

5. Статистическая обработка: по всем прогонам вычисляются среднее $\widehat{K_{\text{г}}}$, доверительный интервал, а также эмпирическое распределение времени восстановления.

Верификация проведена для всех аналитических случаев. Параметры подбирались так, чтобы значения $K_{\text{г}}$ находились в диапазоне 0,99–0,999. Результаты, пред-

[1] Девятков Т. В. *Методы и средства имитационного моделирования в задачах исследования и проектирования дискретно-событийных систем*: автореф. дис. … канд. тех. наук. Москва, 2011. 18 с. EDN: QHLCVR

[2] Seniv M., Zdebskyi S. Improved software system for calculating the reliability indicators of complex technical systems. *Vìsnik Nacìonal'nogo unìversitetu L'vìvs'ka polìtehnìka Serìâ Ìnformacìjnì sistemi ta merežì*, 2024, no. 16, pp. 290–302. https://doi.org/10.23939/sisn2024.16.290

ставленные в табл. 1, показывают совпадение в пределах доверительных интервалов (максимальное расхождение 0,0002), что подтверждает адекватность модели.

Таблица 1

Верификация имитационной модели

Структура		Аналитический $K_г$	Имитационный $K_г$ (среднее ±95 % ДИ)
2 из 3 (один рем. орган)	$\lambda = 2 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, $\mu = 0{,}2$ ч$^{-1}$ ($T_в = 5$ ч)	0,99259	0,9925 ±0,0004
2 из 3 (два рем. органа)	$\lambda = 2 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, $\mu = 0{,}2$ ч$^{-1}$	0,99433	0,9942 ±0,0003
1 осн. + 1 хол. резерв	$\lambda = 1 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, $\mu = 0{,}5$ ч$^{-1}$ ($T_в = 2$ ч)	0,99975	0,99973 ±0,00007
С ненадежным переключателем	$\lambda = 1{\cdot}10^{-4}$ ч$^{-1}$, $\mu = 0{,}5$ ч$^{-1}$ $\lambda_s = 1{\cdot}10^{-5}$ ч$^{-1}$, $\mu_s = 1$ч$^{-1}$	0,9938	0,9936 ±0,0005
Одиночный элемент + ЗИП ($s = 2$)	$\lambda = 0{,}01$ ч$^{-1}$, $\mu = 0{,}1$ ч$^{-1}$	0,9934	0,9932 ±0,0006

Результаты моделирования и их анализ

В качестве примера рассмотрена система управления стрелкой на станции, состоящая из двух каналов и коммутатора, который при отказе основного канала подключает резервный. Коммутатор нерезервируем. Базовые варианты (см. табл. 2) выбраны на основе данных эксплуатации систем ЖАТ.

Таблица 2

Базовые параметры моделируемой системы

Элемент	Закон распределения наработки до отказа	Параметры	Закон распределения времени восстановления	Параметры	Тип резервирования
Канал основной	Вейбулла	$\lambda = 5{\cdot}10^{-5}$ ч$^{-1}$, $\beta = 1{,}2$	Гамма	$\alpha = 2$, $\theta = 2{,}5$ ч	Нагруженный
Канал резервный	Вейбулла	$\lambda = 5{\cdot}10^{-5}$ ч$^{-1}$, $\beta = 1{,}2$	Гамма	$A = 2$, $\theta = 2{,}5$ ч	Нагруженный
Коммутатор	Экспоненциальное	$\lambda_s = 2{\cdot}10^{-5}$ ч$^{-1}$,	Экспоненциальное	$T_{в,s} = 2$ ч	Нерезервируемый

При выбранных параметрах интенсивность отказов каналов возрастает со временем, а время восстановления имеет гамма-распределение с положительной асимметрией.

На рис. 1 представлена зависимость $K_г$ от числа ремонтных бригад $n_г$ при фиксированных остальных параметрах. Увеличение количества бригад с 1 до 3 повышает $K_г$ с 0,9912 до 0,9956. Дальнейшее увеличение дает меньший прирост, что позволяет определить рациональное число бригад[1].

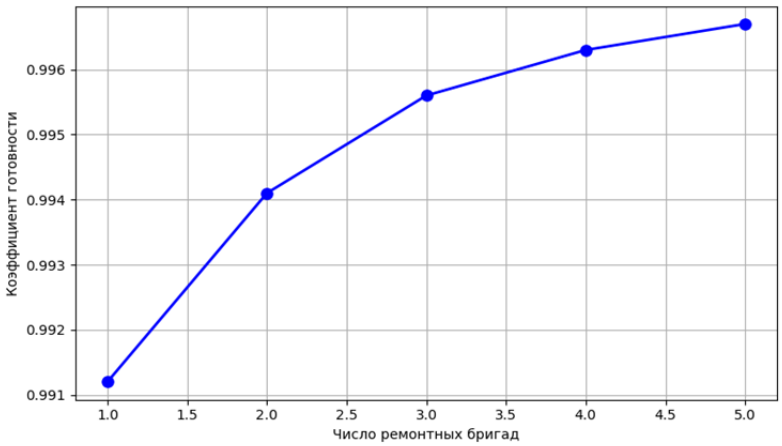


Рис. 1. Влияние числа ремонтных бригад на коэффициент готовности

На рис. 2 показана зависимость $K_г$ от количества запасных комплектов. При увеличении запаса с 0 до 3 комплектов $K_г$ возрастает с 0,988 до 0,994. Эффект насыщения наблюдается после 2 комплектов.

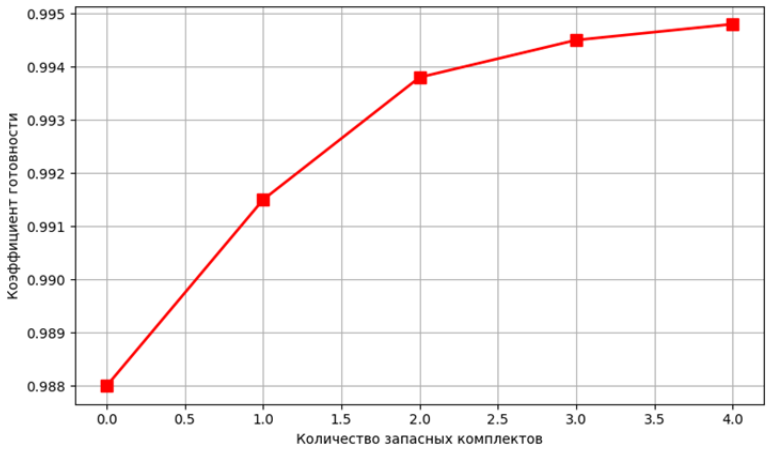


Рис. 2. Влияние объема ЗИП на коэффициент готовности

[1] Бурсиан Е. Ю., Проурзин В. А., Проурзин О. В. Сравнительный анализ методов оценки надежности по большим данным эксплуатации сложных систем. *Надежность*, 2023, т. 23, № 4, с. 25–30. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-25-30; EDN: WWHHYY

На рис. 3 приведены результаты моделирования для системы с периодическим ТО каналов с длительностью $\tau_{то} = 1$ и различными периодами $T_{то}$. При $T_{то} = 168$ ч $K_г$ снижается до 0,988, тогда как без ТО – 0,993. Слишком частое ТО ухудшает готовность из-за простоев, а редкое – не дает эффекта снижения отказов.

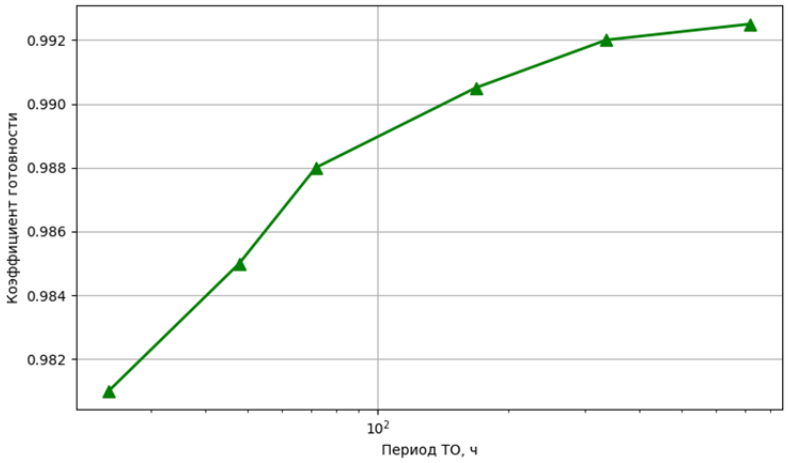


Рис. 3. Влияние периодичности ТО на коэффициент готовности

Проведен анализ чувствительности $K_г$ к изменению параметров распределений (см. рис. 4). Наибольшее влияние оказывает интенсивность отказов коммутатора (градиент $\partial K_г / \partial \lambda_s \approx -1500$), что подтверждает необходимость высокой надежности переключающих устройств.

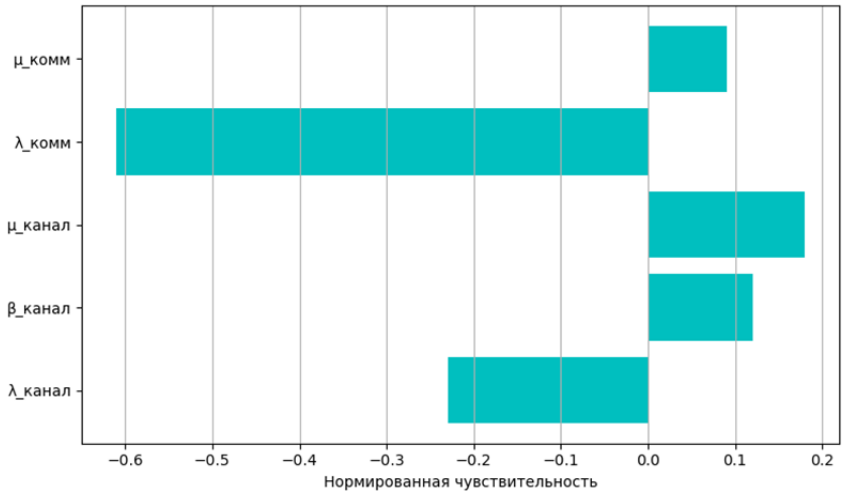


Рис. 4. Анализ чувствительности: нормированные частные производные

Практическое применение и обсуждение

Разработанная модель позволяет решать следующие практические задачи:

– обоснование структуры резервирования по критерию $K_г$ при заданных затратах;

– оптимизация ресурсов восстановления (число ремонтных бригад, объем ЗИП);

– планирование периодичности ТО с учетом простоев и снижения отказов;

– оценка влияния старения при продлении срока службы.

Для наглядности на рис. 5 приведена трехмерная поверхность $K_г = f(n_r, s)$, построенная по результатам моделирования. Такие зависимости позволяют проектировщику быстро выбрать компромиссные решения.

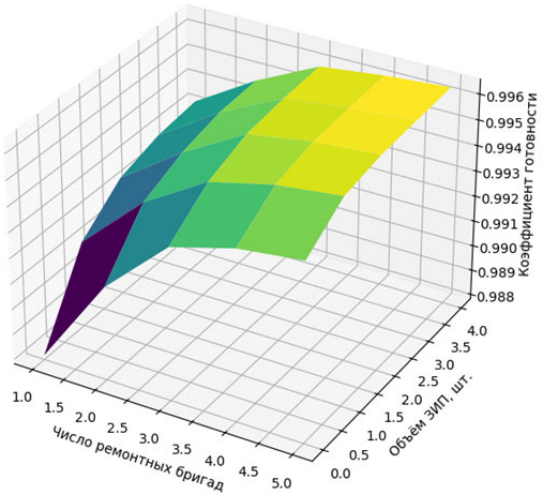


Рис. 5. Зависимость $K_г$ от числа ремонтных бригад и объема ЗИП

Выводы

Разработана и верифицирована имитационная модель оценки коэффициента готовности систем ЖАТ, учитывающая немарковские распределения, многоканальное восстановление, ограниченный ЗИП и периодическое ТО. Модель пригодна для использования в проектных организациях и эксплуатирующих подразделениях.

Дальнейшие исследования направлены на интеграцию с системами сбора данных (SCADA) для создания цифрового двойника системы ЖАТ.

Список литературы / References

Бурсиан Е. Ю., Проурзин В. А., Проурзин О. В. Сравнительный анализ методов оценки надежности по большим данным эксплуатации сложных систем. *Надежность*, 2023, т. 23, № 4, с. 25–30. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-25-30; EDN: WWHHYY

Bursian E. Iu., Prourzin V. A., Prourzin O. V. A comparative analysis of the methods of evaluating dependability using Big Data of complex system operation. *Dependability*, 2023, vol. 23, no. 4, pp. 25–30. (In Russ.) https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-25-30; EDN: WWHHYY

Веселова А. С. *Оценка качества технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики*: дис. … канд. техн. наук. Москва: [б. и.], 2020. 270 с. EDN: DLDIGJ

Veselova A. S. *Assessment of technical operation and maintenance quality of railway automation and telemechanics systems*: Cand. thesis in Technical Sciences. Moscow, 2020. 270 p. (In Russ.) EDN: DLDIGJ

Девятков Т. В. *Методы и средства имитационного моделирования в задачах исследования и проектирования дискретно-событийных систем*: автореф. дис. … канд. техн. наук. Москва: [б. и.], 2011. 18 с. EDN: QHLCVR

Deviatkov T. V. *Methods and means of simulation modeling in the tasks of research and design of discrete-event systems*: Abstract Cand. thesis in Technical Sciences. Moscow, 2011. 18 p. (In Russ.) EDN: QHLCVR

Журавлев И. А. *Модели и методы оценки показателей надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики*: дис. … канд. техн. наук. Москва: [б. и.], 2013. 236 с. EDN: SUSQWP

Zhuravlev I. A. *Models and methods for assessing reliability indicators of railway automation and telemechanics systems*: Cand. thesis in Technical Sciences. Moscow, 2013. 236 p. (In Russ.) EDN: SUSQWP

Константинова Т. Ю., Лыков А. А., Марков Д. С., Наседкин О. А., Соколов В. Б. Технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики. *Автоматика на транспорте*, 2023, № 2, с. 193–204. https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204; EDN: HYPJQU

Konstantinova T. Iu., Lykov A. A., Markov D. S., Nasedkin O. A., Sokolov V. B. Technology of simulation modeling for railway automation and remote control systems. *Transport automation research*, 2023, no. 2, pp. 193–204. (In Russ.) https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204; EDN: HYPJQU

Посеренин С. П. *Теоретические основы стратегий технического обслуживания машин и технологического оборудования*: дис. … д-р техн. наук. Москва: [б. и.], 2005. 381 с. EDN: NNPVRP

Poserenin S. P. *Theoretical foundations of machine and process equipment maintenance strategies*: Dr thesis in Technical Sciences. Moscow, 2005. 381 p. (In Russ.) EDN: NNPVRP

Привалов А. Е., Дорожко И. В., Захарова Е. А., Копейка А. Л. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования. *Труды МАИ*, 2018, № 103, с. 28. EDN: VUAPGJ

Privalov A. E., Dorozhko I. V., Zakharova E. A., Kopeika A. L. Simulation model for assessing the availability of technical systems taking into account characteristics of the diagnostic process. *Electronic journal "Trudy MAI"*, 2018, no. 103, p. 28. (In Russ.) EDN: VUAPGJ

Родионов И. В. *Вероятностный и статистический анализ экстремумов дискретных стохастических систем*: дис. … д-р физ.-мат. наук. Москва: [б. и.], 2021. 259 с. EDN: IPSWQR

Rodionov I. V. *Probabilistic and statistical analysis of extrema in discrete stochastic systems*: Dr thesis in Physical and Mathematical Sciences. Moscow, 2021. 259 p. (In Russ.) EDN: IPSWQR

Рябинин И. А. *Надежность и безопасность структурно-сложных систем*. Санкт-Петербург: Политехника, Издательство Санкт-Петербургского университета, 2012. 277 с. EDN: RYRPPV

Riabinin I. A. *Reliability and safety of structurally complex systems*. St Petersburg: Politekhnika, Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2012. 277 p. (In Russ.) EDN: RYRPPV

Садовникова Н. П., Парыгин Д. С., Ерещенко Т. В., Рашевский Н. М. *Имитационное моделирование*. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. 128 с. EDN: IVSWCJ

Sadovnikova N. P., Parygin D. S., Ereshchenko T. V., Rashevskii N. M. *Simulation modeling*. Volgograd: Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2022. 128 p. (In Russ.) EDN: IVSWCJ

Сапожников В. В., Сапожников В. В., Ефанов Д. В. *Основы теории надежности и технической диагностики*. Санкт-Петербург: Лань, 2019. 588 с. EDN: IZBJPZ

Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Fundamentals of reliability theory and technical diagnostics*. St Petersburg: Lan', 2019. 588 p. (In Russ.) EDN: IZBJPZ

СТО РЖД 19.002-2017. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Москва: Стандартинформ, 2017. 16 с.

Company standard Russian Railways 19.002-2017. Railway automation and telemechanics systems and devices. Moscow: Standartinform, 2017. 16 p. (In Russ.)

Хромушкин К. Д. *Управление надежностью устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на всех этапах их жизненного цикла*: дис. … канд. техн. наук. Серпухов: [б. и.], 2011. 140 с. EDN: QFIRAD

Khromushkin K. D. *Managing reliability of railway automation and telemechanics devices at all stages of their life cycle*: Cand. thesis in Technical Sciences. Serpukhov, 2011. 140 p. (In Russ.) EDN: QFIRAD

Шмидт О. О. *Обобщенная модель процесса восстановления в теории надежности использования информационных технологий*: дис. … канд. физ.-мат. наук. Красноярск: [б. и.], 2008. 125 с. EDN: NQDJUD

Shmidt O. O. *Generalized recovery process model in information technology reliability theory*: Cand. thesis in Physical and Mathematical Sciences. Krasnoiarsk, 2008. 125 p. (In Russ.) EDN: NQDJUD

Seniv M., Zdebskyi S. Improved software system for calculating the reliability indicators of complex technical systems. *Vìsnik Nacìonal'nogo unìversitetu L'vìvs'ka polìtehnìka Serìâ Ìnformacìjnì sistemi ta merežì*, 2024, no. 16, pp. 290–302. https://doi.org/10.23939/sisn2024.16.290

Сведения об авторе

Елена Витальевна Кузьмина – ассистент, https://orcid.org/0009-0004-1837-7989, kuzminaelena96@yandex.ru, Российский университет транспорта (МИИТ) (д. 9, стр. 9, ул. Образцова, 127055 Москва, Россия); **Elena V. Kuzmina** – Assistant Lecturer, https://orcid.org/0009-0004-1837-7989, kuzminaelena96@yandex.ru, Russian University of Transport (MIIT) (9, str. 9, ul. Obraztsova, 127055 Moscow, Russia).

Статья поступила в редакцию 26.04.2026; одобрена после рецензирования 27.05.2026; принята к публикации 18.06.2026.

The article was submitted 26.04.2026; Approved after reviewing 27.05.2026; Accepted for publication 18.06.2026.