

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-4-410

EDN: BBZCAA



УДК 625.143.001.57

Научная статья | Управление процессами перевозок

МОДЕЛИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЙ

В.А. Надежкин, С.А. Надежкина

Аннотация

Обоснование. Токопроводящие стыки рельсовых линий являются критически важным элементом для работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Их отказы приводят к сбоям в рельсовых цепях, искажая информацию о положении поездов и создавая угрозы безопасности. Классические методы оценки надежности (марковские модели и статистический аппарат) имеют существенные ограничения, так как не учитывают неэкспоненциальный характер износа стыков и влияние эксплуатационных факторов (нагрузка, климат, качество обслуживания).

Цель – разработка и анализ усовершенствованных подходов к оценке надежности токопроводящих стыков, преодолевающих ограничения классических моделей, с использованием аппарата полумарковских процессов и практических методов ретроспективного и матричного анализа.

Материалы и методы. Аппарат полумарковских процессов, позволяющий использовать произвольные законы распределения времени наработки на отказ (Вейбулла, логарифмически нормальное и др.), что адекватнее описывает процессы деградации. Сравнение фактических и нормативных параметров потока отказов (ω) и коэффициента вынужденного простоя (κ) для диагностики состояния участков пути. Анализ зависимости интенсивности отказов стыков от их возраста на основе матрицы отказов, позволяющий выявить периоды приработки, нормальной эксплуатации и старения.

Результаты. В статье подтверждена адекватность полумарковских моделей для описания неэкспоненциального характера износа токопроводящих стыков. Разработана система критериев для ретроспективной оценки, позволяющая дифференцировать влияние физического износа стыков и качества их эксплуатационного обслуживания на надежность работы ЖАТ. Показано, что матричный метод эффективно выявляет зависимость интенсивности отказов от возраста, что является основой для перехода от реактивного к предиктивному (прогнозному) техническому обслуживанию.

Ключевые слова: токопроводящие стыки; надежность; полумарковские процессы; параметр потока отказов; коэффициент вынужденного простоя; матричный метод; интенсивность отказов

Для цитирования. Надежкин, В. А., & Надежкина, С. А. (2025). Модели статистической оценки показателей надежности рельсовых линий. *Transportation and Information Technologies in Russia / Транспорт и информационные технологии*, 15(4), 48–64. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-410>

Original article | Transportation Process Management

STATISTICAL ESTIMATION MODELS FOR RAIL LINE RELIABILITY INDICATORS

V.A. Nadezhkin, S.A. Nadezhkina

Abstract

Background. Conducting joints of rail lines are a critical element for the operation of railway automation and telemechanics devices. Their failures lead to malfunctions in track circuits, distorting information about train locations and creating safety hazards. Classical reliability assessment methods (Markov models and statistical tools) have significant limitations, as they do not account for the non-exponential nature of joint wear and the influence of operational factors (load, climate, maintenance quality).

Purpose. to develop and analyze improved approaches for assessing the reliability of conducting joints, overcoming the limitations of classical models, using the framework of semi-Markov processes and practical methods of retrospective and matrix analysis.

Materials and methods. The framework of semi-Markov processes, which allows for the use of arbitrary distributions of time-to-failure (Weibull, log-normal, etc.), thus providing a more adequate description of degradation processes. A comparison of actual and normative parameters of the failure flow (ω) and the forced downtime ratio (κ) for diagnosing the condition of track sections. Analysis of the dependence of joint failure rate on their age based on a failure matrix, enabling the identification of burn-in, normal operation, and aging periods.

Results. The article confirms the adequacy of semi-Markov models for describing the non-exponential wear of conducting joints. A system of criteria for retrospective assessment has been developed, allowing for the differentiation of the influence of physical wear of the joints and the quality of their operational maintenance on the reliability of railway automation and telemechanics. It is shown that the matrix method effectively reveals the dependence of the failure rate on age, which forms the basis for transitioning from reactive to predictive maintenance.

Keywords: conducting joints; reliability; semi-Markov processes; failure flow parameter; forced downtime ratio; matrix method; failure rate

For citation. Nadezhkin, V. A., & Nadezhkina, S. A. (2025). Statistical estimation models for rail line reliability indicators. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(4), 48–64. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-4-410>

Введение

Бесперебойное и безопасное функционирование железнодорожного транспорта напрямую зависит от надежной работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Ключевым элементом, обеспечивающим передачу информации о занятости путевых участков и формирование сиг-

налов для автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), является рельсовая цепь. Ее корректная работа, в свою очередь, обусловлена состоянием токопроводящих стыковых соединений рельсовой линии. Нарушение целостности и проводимости этих стыков приводит к росту переходного сопротивления, что вызывает искажение информации, ложные занятости, сбои в системе СЦБ и, как следствие, создает прямую угрозу безопасности движения, снижая пропускную способность инфраструктуры [1; 2].

В настоящее время для оценки и прогнозирования надежности электрооборудования, включая токопроводящие стыки, широко применяется классический статистический аппарат и марковские модели. Однако эти подходы обладают существенными ограничениями. Классические методы часто пренебрегают влиянием эксплуатационных факторов (динамика нагрузок, климатические условия, качество обслуживания), а марковские модели предполагают экспоненциальный закон распределения наработки на отказ, что не всегда адекватно описывает реальные процессы постепенной деградации и старения стыков, характеризующиеся периодами нормальной эксплуатации и последующего резкого увеличения интенсивности отказов.

В связи с этим актуальной задачей является разработка и адаптация более совершенных математических моделей и практических методов, позволяющих учитывать неэкспоненциальный характер износа и влияние внешних факторов для точной оценки текущего состояния и остаточного ресурса токопроводящих стыков [3; 4].

Материалы и методы

Надежность рельсовой линии является фундаментальным условием безопасной организации движения поездов. Особое место в этой системе занимают токопроводящие стыки, от состояния которых напрямую зависит корректная работа устройств ЖАТ, в

частности, рельсовых цепей. Нарушение контакта в стыке приводит к увеличению переходного сопротивления, что может вызвать ложную занятость путевого участка, сбой в работе автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и, как следствие, нарушение графика движения и снижение пропускной способности.

Классический математический аппарат обработки статистики для оценки показателей надежности электрооборудования, включая токопроводящие стыки, изложен в работах [5-7] и состоит из последовательности этапов:

1. Представление статистического материала по отказам в виде вариационного или статистического ряда (гистограммы).
2. Выбор вида закона распределения случайной величины (наработки на отказ, времени восстановления).
3. Проверка согласия эмпирического распределения с принятым теоретическим законом (например, с помощью критериев χ^2 , Колмогорова-Смирнова).
4. Оценка параметров выбранного закона распределения.
5. Непосредственный расчет показателей надежности (вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ, интенсивность отказов).

Главным требованием к статистическому материалу является однородность исходных данных, так как массив формируется за продолжительный период эксплуатации и по большому количеству однотипных элементов. Основное достоинство этого подхода – формирование представительной выборки, что повышает достоверность полученного эмпирического закона распределения.

Существенным недостатком, особенно актуальным для токопроводящих стыков, работающих в разных условиях, является пренебрежение эксплуатационными факторами. В рамках классического подхода не учитываются различия в рабочих токах, качестве монтажа и технического обслуживания, климатических условиях (температура, влажность, загрязненность

атмосферы), что может приводить к значительным погрешностям в оценках.

Полумарковские модели в оценке надежности токопроводящих стыков.

Классические однородные марковские модели с непрерывным временем, широко применяемые для оценки надежности электрооборудования, обладают существенным ограничением: они предполагают экспоненциальное распределение интенсивностей переходов между состояниями (исправно, неисправно, дефект и т.д.). Для многих физических процессов, включая деградацию токопроводящих стыков под воздействием электрической нагрузки, термических циклов и окружающей среды, это предположение является излишне жестким и не всегда соответствует экспериментальным данным.

Преодолеть указанное ограничение позволяет переход к полумарковским моделям. Полумарковские процессы представляют собой важное обобщение марковских процессов. Основное отличие заключается в том, что время пребывания элемента или системы в jj -м состоянии описывается произвольной функцией распределения $F_{jk}(t)$ $F_{jk}(t)$, а не только экспоненциальной.

Это открывает возможности для более точного моделирования. При наличии достаточной статистической информации о времени безотказной работы токопроводящих стыков, времени возникновения дефектов (таких как ослабление контактного давления, окисление поверхностей) или наработке до отказа, можно идентифицировать реальные статистические законы распределения (Вейбулла, логарифмически нормальное, гамма-распределение и др.) и использовать адекватный математический аппарат.

Важными соотношениями в полумарковском подходе являются:

- Среднее время пребывания в jj -м состоянии до перехода в kk -е состояние равно безусловному среднему времени пребывания в jj -м состоянии.

- Интенсивность потока событий, выводящего оборудование из состояния $j\bar{j}$, является обратной величиной среднего времени пребывания в этом состоянии [8, 9, 10].

Под интенсивностями потоков событий понимаются ключевые единичные показатели надежности:

- Интенсивность потока отказов $\lambda(t)$ $\lambda(t)$
- Параметр потока отказов $\varphi(t)$ $\varphi(t)$
- Интенсивность потока дефектов $\lambda_n(t)$ $\lambda_n(t)$
- Интенсивность восстановления $\mu(t)$ $\mu(t)$

Использование однородных марковских и полумарковских моделей для описания реальных процессов старения и отказов токопроводящих стыков требует дополнительных исследований, в частности, в направлении учета эксплуатационных факторов (динамика нагрузок, качество технического обслуживания, климатические воздействия) при оценке итоговых показателей надежности.

Метод ретроспективной оценки на основе параметров потока отказов стыков.

Для ретроспективной оценки технического состояния участка пути по состоянию стыковых соединений применяется метод [6], основанный на сравнении параметров потока отказов ω и коэффициента вынужденного простоя $K_{вп}$, вызванного этими отказами. Отказ стыка здесь трактуется как событие, приводящее к нарушению работы устройств ЖАТ и требующее немедленного вмешательства.

Усредненный расчетный параметр потока отказов стыков $\omega(p)$ $\omega(p)$ и коэффициент вынужденного простоя $K_{вп}(p)$ $K_{вп}(p)$ определяются как:

$$\omega(p) = n(p)t, K_{вп}(p) = \Delta T(p)t, \omega(p) = tn(p), K_{вп}(p) = t\Delta T(p), \quad (1.1)$$

где $n(p)$ $n(p)$ – расчетное количество отказов стыков на рассматриваемом участке за время t ; $\Delta T(p)$ $\Delta T(p)$ – расчетное время простоя участка из-за отказов стыков.

Фактические показатели $\omega(\phi)$ $\omega(\phi)$ и $K_{вп}(\phi)$ $K_{вп}(\phi)$ вычисляются по данным эксплуатации, а средние по сети значения $\omega(cp)$ $\omega(cp)$ и $K_{вп}(cp)$ $K_{вп}(cp)$ берутся из базы данных.

Таблица 1.

**Критерии определения технического состояния участка пути
по надежности стыковых соединений**

№ варианта	Критерий оценки	Оценка состояния	Потенциальное техническое состояние стыков и влияние на ЖАТ
1	$\omega(\phi) \approx \omega(p) > \omega(cp)$ $K_{\text{en}}(\phi) \approx K_{\text{en}}(p) > K_{\text{en}}(cp)$ $K_{\text{en}}(\phi) \approx K_{\text{en}}(p) > K_{\text{en}}(cp)$	Неудовлетворительное	Высокий риск частых сбоев рельсовых цепей, нестабильная работа АЛС.
2	$\omega(\phi) \approx \omega(p) > \omega(cp)$ $\omega(\phi) \approx \omega(p) > \omega(cp)$ $K_{\text{en}}(\phi) \approx K_{\text{en}}(p) > K_{\text{en}}(cp)$ $K_{\text{en}}(\phi) \approx K_{\text{en}}(p) > K_{\text{en}}(cp)$	Хорошее	Низкий риск нарушений в работе ЖАТ.
3	$\omega(p) > \omega(\phi) > \omega(cp)$ $\omega(p) > \omega(\phi) > \omega(cp)$ $K_{\text{en}}(p) > K_{\text{en}}(\phi) > K_{\text{en}}(cp)$ $K_{\text{en}}(p) > K_{\text{en}}(\phi) > K_{\text{en}}(cp)$	Хорошее, благодаря высокому уровню эксплуатации	Стыки физически изношены, но качественное обслуживание (регулярная подтяжка, замена) предотвращает сбои ЖАТ.
4	$\omega(p) > \omega(\phi) > \omega(cp)$ $\omega(p) > \omega(\phi) > \omega(cp)$ $K_{\text{en}}(p) > K_{\text{en}}(\phi) > K_{\text{en}}(cp)$ $K_{\text{en}}(p) > K_{\text{en}}(\phi) > K_{\text{en}}(cp)$	Неудовлетворительное, но уровень эксплуатации высок	Потенциальная опасность скрытых дефектов, которые могут проявиться при ухудшении обслуживания.
5	$\omega(\phi) > \omega(cp) > \omega(p)$ $\omega(\phi) > \omega(cp) > \omega(p)$ $K_{\text{en}}(\phi) > K_{\text{en}}(cp) > K_{\text{en}}(p)$ $K_{\text{en}}(\phi) > K_{\text{en}}(cp) > K_{\text{en}}(p)$	Плохое, вследствие низкого уровня эксплуатации	Новые или хорошие стыки деградируют из-за плохого обслуживания, ведущего к постоянным ложным занятиям рельсовых цепей.
6	$\omega(p) < \omega(\phi) < \omega(cp)$ $\omega(p) < \omega(\phi) < \omega(cp)$ $K_{\text{en}}(p) < K_{\text{en}}(\phi) < K_{\text{en}}(cp)$ $K_{\text{en}}(p) < K_{\text{en}}(\phi) < K_{\text{en}}(cp)$	Хорошее, но уровень эксплуатации низкий	Стыки имеют высокий запас надежности, но пренебрежение обслуживанием ведет к учащению инцидентов с ЖАТ.

Матричный метод обработки статистики отказов стыков

Матричный метод [5] позволяет анализировать зависимость интенсивности отказов стыков от их возраста [11; 12]. Исходные данные представляются в виде матрицы, где строки – год укладки рельсошпальной решетки (или год сборки стыковых соединений), а столбцы – год эксплуатации.

Таблица 2.

Фрагмент матрицы отказов токопроводящих стыков

Год укладки, nt	Отказы стыков по годам эксплуатации (t)			
	1	2	3	j
2020	–	$M_{20,21}M_{20,21}$	$M_{20,22}M_{20,22}$	$M_{20,20+j}M_{20,20+j}$
2021	–	–	$M_{21,22}M_{21,22}$	$M_{21,21+j}M_{21,21+j}$
2022	–	–	–	$M_{22,22+j}M_{22,22+j}$

Интенсивность отказов стыков в возрасте jj лет рассчитывается по формуле:

$$\lambda(j) = \sum imi, i + j \sum ini - \sum k \sum lmk, l, \lambda(j) = \sum ini - \sum k \sum lmk, l \sum imi, i + j, (1.2)$$

где числитель – количество отказов всех стыков в возрасте jj лет, а знаменатель – количество стыков, находившихся в эксплуатации и работоспособных к возрасту jj лет.

Построение зависимости $\lambda(j)\lambda(j)$ позволяет выявить характерные периоды: приработки, нормальной эксплуатации и старения, что критически важно для планирования ремонтов и замены стыковых соединителей до того, как их отказы начнут массово влиять на работу ЖАТ [13-15].

Результаты и обсуждение

Анализ механизмов старения токопроводящих стыков (ослабление контакта, термическая усталость, коррозия) показывает, что процессы деградации носят неэкспоненциальный характер. Накопление повреждений часто имеет период «старения», после которого интенсивность отказов резко возрастает. Это делает применение полумарковских моделей с произвольным законом распределения времени до отказа (например, распределением Вейбулла с параметром формы $\beta > 1$) теоретически обоснованным [16; 17].

Основное преимущество такого подхода – возможность более точного прогнозирования остаточного ресурса стыков на основе реальных данных об отказах, а не на основе упрощенных моделей.

Однако ключевой проблемой внедрения является необходимость сбора большого объема высококачественных данных для идентификации параметров моделей, что требует создания специализированных систем мониторинга и учета.

Метод ретроспективной оценки на основе параметров потока отказов является практичным инструментом для экспресс-диагностики состояния парка токопроводящих стыков. Его главное достоинство – наглядность и относительная простота. Представленная в Таблице 1 система критериев позволяет не только констатировать состояние, но и в определенной степени дифференцировать влияние собственного старения оборудования и качества эксплуатации.

Для токопроводящих стыков это особенно важно, так как их состояние сильно зависит от соблюдения регламентов технического обслуживания (подтяжка болтовых соединений, очистка контактных поверхностей). Например, вариант 5 из Таблицы 1 (плохое состояние из-за низкого уровня эксплуатации при потенциально хорошем состоянии оборудования) может быть типичным для стыков, обслуживание которых проводится нерегулярно или с нарушениями.

Основным недостатком метода, как и классического подхода, является усреднение данных и игнорирование индивидуальных эксплуатационных факторов. Стыки, работающие в разных условиях эксплуатации (с разной нагрузкой) и в разных климатических зонах, условно считаются однотипными, что снижает точность оценки.

Матричный метод предоставляет более детальную информацию о зависимости интенсивности отказов от возраста. Построение функции $\lambda^-(t)\lambda^-(t)$ для токопроводящих стыков позволяет выявить характерные периоды их «жизни»: приработка, нормальной эксплуатации и старения. Это ценно для планирования ремонтов и замен.

Однако для стыков, которые являются частью более сложного оборудования (например, силовых трансформаторов), выделение данных именно по отказам стыков из общей статистики отказов может быть затруднено. Кроме того, метод, как справедливо отмечено в исходном материале [18, 19, 20] не позволяет оценить

текущие процессы деградации в произвольный момент времени, а фиксирует лишь факт отказа. Он также страдает от той же проблемы неоднородности данных, так как в анализ попадают стыки разного возраста, эксплуатирующиеся в разных условиях.

Заключение

Надежность токопроводящих стыков является системообразующим фактором для бесперебойной и безопасной работы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Отказы стыков непосредственно приводят к сбоям в рельсовых цепях и искажению информации о положении поездов. Аппарат полумарковских процессов является адекватным инструментом для моделирования надежности стыковых соединений, так как позволяет учитывать неэкспоненциальный характер их износа. Метод ретроспективной оценки на основе сравнения параметров потока отказов и коэффициента простоя позволяет не только оценить техническое состояние стыков, но и дифференцировать вклад физического износа и качества эксплуатационного обслуживания в возникающие проблемы с ЖАТ. Матричный метод эффективно выявляет зависимость интенсивности отказов стыков от их возраста, что позволяет заблаговременно планировать профилактические работы и предотвращать массовые нарушения в работе систем автоматики. Для повышения точности прогнозов необходима разработка интегрированных моделей, связывающих статистику отказов стыков с мониторингом их электрических параметров (переходного сопротивления) в реальном времени. Это позволит перейти от реагирования на отказы к предиктивному обслуживанию, минимизирующему риски для системы ЖАТ и безопасности движения в целом.

Список литературы

1. Цветков, В. А. (1992). Математическая модель для анализа надёжности генераторов с учётом развития дефектов. *Электричество*, (11), 64–65.

2. Вентцель, Е. С. (1969). *Теория вероятностей* (4-е изд.). Москва: Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 576 с. EDN: <https://elibrary.ru/NRYKLC>
3. Вентцель, Е. С., & Овчаров, Л. А. (1991). *Теория случайных процессов и её инженерные приложения*. Москва: Наука, 384 с. ISBN: 5-02-014125-9. EDN: <https://elibrary.ru/YNMQIF>
4. Гмурман, В. Е. (2008). *Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие* (12-е изд., перераб.). Москва: Высш. образование, 479 с.
5. Руденко, Ю. Н. (Ред.). (2000). *Надёжность систем энергетики и их оборудования: справочник: в 4 т. Т. 2: Надёжность электроэнергетических систем* / под ред. М. Н. Розанова. Москва: Энергоатомиздат, 568 с.
6. Беляев, Ю. К., [и др.]; Ушаков, И. А. (Ред.). (1985). *Надёжность технических систем: справочник*. Москва: Радио и связь, 608 с.
7. Рутковская, Д., Пилиньский, М., & Рутковский, Л. (2007). *Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы* / пер. с польск. И. Д. Рудинского. Москва: Горячая линия — Телеком, 452 с.
8. Северцев, Н. А., Мухин, А. В., & Ефимов, И. А. (2007). Математические основы теории выбора решений, обеспечивающих надёжность и безопасность систем. В кн.: *Труды международного симпозиума «Надёжность и качество»* (Т. 2, с. 121–123). EDN: <https://elibrary.ru/NDUPWV>
9. Сапожников, В. В., Сапожников, В. В., & Ефанов, Д. В. (2019). *Основы теории надёжности и технической диагностики*. Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 588 с. ISBN: 978-5-8114-3453-4. EDN: <https://elibrary.ru/IZBJPZ>
10. Надежкин, В. А. (2025). Оптимизация диагностирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики по техническому состоянию. В кн.: *Актуальные проблемы в транспортной отрасли: Материалы Всероссийской научно-исследовательской конференции, Воронеж, 25 апреля 2025 года* (с. 35–38). Воронеж:

- ООО Издательско-полиграфический центр «Научная книга».
EDN: <https://elibrary.ru/DABEQJ>
11. Тарасов, Е. М., Тарасова, А. Е., & Надежкин, В. А. (2022). К вопросу автоматизации технической диагностики и мониторинга. *Наука и образование транспорту*, (1), 362–364. EDN: <https://elibrary.ru/ZLIYYT>
 12. Тарасов, Е. М., & Надежкин, В. А. (2024). Диагностирование в жизненном цикле изолирующих стыков рельсовых цепей. *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*, (2), 45–50. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-02-6>. EDN: <https://elibrary.ru/DSUOVV>
 13. Ефанов, Д. В. (2016). *Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография*. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 171 с. ISBN: 978-5-7641-0933-6. EDN: <https://elibrary.ru/XAFAIN>
 14. Ефанов, Д. В. (2014). Метод автоматизации проверки логики функционирования объектов диагностирования в системах удалённого контроля и мониторинга. *Транспорт Урала*, (3), 58–62. EDN: <https://elibrary.ru/SVNLBZ>
 15. Сапожников, В. В., & Сапожников, Вл. В. (2004). *Основы технической диагностики*. Москва: Маршрут, 316 с. ISBN: 5-89035-123-0. EDN: <https://elibrary.ru/QNRRAL>
 16. Сапожников, В. В., Сапожников, Вл. В., & Лыков, А. А. (2004). Теоремы анализа для обнаружения неисправностей типа «временная задержка». *Электронное моделирование*, 26(3), 83–93.
 17. Tarasov, E., Nadezhkin, V., Nadezhkina, S., [et al.]. (2023). Insulating joints as a destabilizing factor in the operation of the track circuit. In *VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023), Karshi, 14–16 июня 2023 года* (p. 1019). Les Ulis: EDP SCIENCES SA. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341101019>. EDN: <https://elibrary.ru/YMJQQR>
 18. Сапожников, Вал. В., Сапожников, Вл. В., & Шаманов, В. И. (2003). *Надёжность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп.*

- / под ред. Вл. В. Сапожникова. Москва: Маршрут, 263 с. ISBN: 5-89035-119-2. EDN: <https://elibrary.ru/QNRGQL>
19. Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R. N., [et al.]. (2001). The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 638–646.
20. Сорокин, А. С. (2008). Математическое моделирование оценки надёжности технологических систем. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, (5), 28–37. EDN: <https://elibrary.ru/JVZBJT>

References

1. Tsvetkov, V. A. (1992). Mathematical model for analyzing the reliability of generators considering defect development. *Electricity*, (11), 64–65.
2. Ventzel, E. S. (1969). *Probability theory* (4th ed.). Moscow: Main Editorial Board of Physical and Mathematical Literature, Nauka Publishing House, 576 p. EDN: <https://elibrary.ru/NRYKLC>
3. Ventzel, E. S., & Ovcharov, L. A. (1991). *Theory of random processes and its engineering applications*. Moscow: Nauka, 384 p. ISBN: 5-02-014125-9. EDN: <https://elibrary.ru/YNMQIF>
4. Gmurman, V. E. (2008). *Probability theory and mathematical statistics: textbook* (12th ed., revised). Moscow: Higher Education, 479 p.
5. Rudenko, Yu. N. (Ed.). (2000). *Reliability of energy systems and their equipment: reference book in 4 vols. Vol. 2: Reliability of electric power systems* / Ed. by M. N. Rozanov. Moscow: Energoatomizdat, 568 p.
6. Belyaev, Yu. K., [et al.]; Ushakov, I. A. (Ed.). (1985). *Reliability of technical systems: reference book*. Moscow: Radio and Communication, 608 p.
7. Rutkovskaya, D., Pilinsky, M., & Rutkovsky, L. (2007). *Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems* / Translated from Polish by I. D. Rudinsky. Moscow: Goryachaya Liniya — Telekom, 452 p.
8. Severtsev, N. A., Mukhin, A. V., & Efimov, I. A. (2007). Mathematical foundations of decision-making theory ensuring system reliability and

- safety. In: *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”* (Vol. 2, pp. 121–123). EDN: <https://elibrary.ru/NDUPWV>
9. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. V., & Efanov, D. V. (2019). *Fundamentals of reliability theory and technical diagnostics*. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 588 p. ISBN: 978-5-8114-3453-4. EDN: <https://elibrary.ru/IZBJPZ>
 10. Nadezhkin, V. A. (2025). Optimization of diagnostics of railway automation and remote control systems based on technical condition. In: *Actual problems in the transport industry: Proceedings of the All-Russian Scientific Research Conference, Voronezh, April 25, 2025* (pp. 35–38). Voronezh: LLC Publishing and Printing Center “Nauchnaya Kniga”. EDN: <https://elibrary.ru/DABEQJ>
 11. Tarasov, E. M., Tarasova, A. E., & Nadezhkin, V. A. (2022). On the issue of automation of technical diagnostics and monitoring. *Science and Education for Transport*, (1), 362–364. EDN: <https://elibrary.ru/ZLIYYT>
 12. Tarasov, E. M., & Nadezhkin, V. A. (2024). Diagnostics in the life cycle of insulating joints of track circuits. *Transport: Science, Technology, Management. Scientific Information Collection*, (2), 45–50. <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2024-02-6>. EDN: <https://elibrary.ru/DSUOVV>
 13. Efanov, D. V. (2016). *Functional control and monitoring of railway automation and remote control devices: monograph*. Saint Petersburg: FGBOU VO PGUPS, 171 p. ISBN: 978-5-7641-0933-6. EDN: <https://elibrary.ru/XAFAIN>
 14. Efanov, D. V. (2014). Method of automating the verification of operation logic of diagnostic objects in remote monitoring systems. *Transport of the Urals*, (3), 58–62. EDN: <https://elibrary.ru/SVNLBZ>
 15. Sapozhnikov, V. V., & Sapozhnikov, V. V. (2004). *Fundamentals of technical diagnostics*. Moscow: Marshrut, 316 p. ISBN: 5-89035-123-0. EDN: <https://elibrary.ru/QNRRAL>
 16. Sapozhnikov, V. V., Sapozhnikov, V. V., & Lykov, A. A. (2004). Theorems of analysis for detecting “time delay” type faults. *Electronic Modeling*, 26(3), 83–93.

17. Tarasov, E., Nadezhkin, V., Nadezhkina, S., [et al.]. (2023). Insulating joints as a destabilizing factor in the operation of the track circuit. In: *VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC VI 2023), Karshi, June 14–16, 2023* (p. 1019). Les Ulis: EDP Sciences S A. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341101019>. EDN: <https://elibrary.ru/YMJDQR>
18. Sapozhnikov, Val. V., Sapozhnikov, Vl. V., & Shamanov, V. I. (2003). *Reliability of railway automation, remote control and communication systems: textbook for railway transport universities* / Ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow: Marshrut, 263 p. ISBN: 5-89035-119-2. EDN: <https://elibrary.ru/QNRGQL>
19. Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R. N., [et al.]. (2001). The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 638–646.
20. Sorokin, A. S. (2008). Mathematical modeling of reliability assessment of technological systems. *Bulletin of Kuzbass State Technical University*, (5), 28–37. EDN: <https://elibrary.ru/JVZBJT>

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Надежкин Вадим Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте
Приволжский государственный университет путей сообщения
ул. Свободы, 2В, г. Самара, 443066, Российская Федерация
vadim_nadezhkin@mail.ru

Надежкина Снежана Андреевна, преподаватель кафедры Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте
Приволжский государственный университет путей сообщения
ул. Свободы, 2В, г. Самара, 443066, Российская Федерация
snezhana.sarycheva.97@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Vadim A. Nadezhkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport

Volga State Transport University

2, Svobody Str., Samara, 443066, Russian Federation

vadim_nadezhkin@mail.ru

SPIN-code: 8267-7012

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3704-1290>

Scopus Author ID: 58087664700

Snezhana A. Nadezhkina, Lecturer at the Department of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport

Volga State Transport University

2, Svobody Str., Samara, 443066, Russian Federation

snezhana.sarycheva.97@mail.ru

SPIN-code: 5291-4300

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3878-267X>

Поступила 20.10.2025

После рецензирования 17.11.2025

Принята 09.12.2025

Received 20.10.2025

Revised 17.11.2025

Accepted 09.12.2025