

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2137>***А. Е. Касымова¹, Н. Т. Карымсакова²**^{1,2}АЛТ университет имени М. Тынышбаева,

Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0102-8799>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8187-2369>*e-mail: kasymova_79@mail.ru

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ ПУТЕМ АППРОКСИМАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТКАЗОВ

Статья посвящена оценке эксплуатационной надежности устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) в условиях перехода к предиктивному техническому обслуживанию. Целью работы является определение критических временных интервалов наработки устройств на основе аппроксимации статистических характеристик их отказов. В ходе исследования проведен расчет вероятности безотказной работы $P^*(t)$, плотности распределения $f^*(t)$ и интенсивности отказов $\lambda^*(t)$ на интервале до 1500 часов. Анализ полученных эмпирических данных и построенных графиков позволил идентифицировать точку перегиба в диапазоне 1100-1150 часов, которая характеризует переход системы из стадии нормальной эксплуатации в фазу интенсивного износа. Установлено, что после преодоления порога в 1100 часов интенсивность отказов возрастает в 2,6 раза, достигая значения 1,212 к концу рассматриваемого периода, а вероятность безотказной работы снижается до 0,426. Сделан вывод, что рубеж в 1100 часов является оптимальным дедлайном для проведения планово-предупредительных ремонтов. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных зависимостей для прогнозирования остаточного ресурса оборудования ЖАТ в рамках цифровизации транспортной инфраструктуры, что позволит существенно повысить безопасность движения поездов и оптимизировать эксплуатационные расходы.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика и телемеханика, надежность, износ, интенсивность отказов, критическая наработка.

Введение

Железнодорожный транспорт является ключевым звеном транспортной системы страны, обеспечивая стабильное функционирование экономики, связность территорий и выполнение масштабных объемов грузовых и пассажирских перевозок. Высокая пропускная и провозная способность, энергетическая эффективность и сравнительно низкая зависимость от погодно-климатических условий определяют стратегическое значение железных дорог. В условиях цифровизации и интенсификации перевозочного процесса требования к бесперебойной работе транспортного комплекса неуклонно растут, что ставит задачи обеспечения безопасности и ритмичности движения поездов в разряд приоритетных.

Безопасность и эффективность функционирования железнодорожного транспорта напрямую зависят от технического состояния средств ЖАТ, которые составляют основу систем управления движением поездов. Усложнение архитектуры этих систем и внедрение микропроцессорных технологий требуют повышения качества их технического обслуживания и ремонта. В современных условиях переход от регламентного обслуживания к техническому обслуживанию по фактическому состоянию становится невозможным без точного прогнозирования показателей надежности. Отказы устройств ЖАТ не только создают риски для безопасности движения, но и приводят к значительным эксплуатационным потерям, что делает задачу объективной оценки их безотказности крайне актуальной.

Современный этап развития транспортной отрасли Республики Казахстан характеризуется глубокой технологической трансформацией, заложенной в Национальном плане развития РК до 2029 года [1]. В соответствии с положениями Концепции цифровой трансформации, развития отрасли информационных технологий и кибербезопасности на 2023-2029 годы [2], приоритетным вектором является переход к интеллектуальным системам управления, основанным на предиктивной аналитике и обработке больших данных (Big Data). Для железнодорожного транспорта это означает необходимость внедрения цифровых инструментов мониторинга, способных в режиме реального времени оценивать техническое состояние инфраструктуры. В этом контексте математическая аппроксимация статистических характеристик интенсивности отказов становится фундаментом для создания цифровых двойников устройств ЖАТ. Подобный подход позволяет не только минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций, но и оптимизировать эксплуатационные расходы, что напрямую коррелирует с задачами по повышению эффективности

транспортных коридоров, обозначенными в Концепции развития транспортно-логистического потенциала до 2030 года [3].

В рамках цифровой трансформации транспортной отрасли Казахстана предполагается внедрение интеллектуальных систем управления, которые базируются на принципах прогнозной аналитики. Однако эффективная работа таких систем невозможна без качественной методологической базы, позволяющей интерпретировать первичные статистические данные об отказах. Таким образом, исследование закономерностей изменения надежности систем автоматики становится не просто технической задачей, а необходимым условием реализации национальных программ по технологическому обновлению железнодорожного комплекса и переходу к цифровой железной дороге.

Более того, в условиях импортозамещения и локализации производства компонентов ЖАТ в Казахстане, возникает необходимость в создании собственных систем мониторинга надежности. Анализ динамики изменения интенсивности отказов позволяет не только планировать закупки запасных частей, но и оценивать качество новых технических решений, внедряемых на сети. Это напрямую коррелирует с целями по снижению эксплуатационных расходов и повышению уровня безопасности движения на магистральных сетях, закрепленными в долгосрочных планах развития транспортной отрасли РК.

Существующие методы оценки надежности зачастую опираются на усредненные показатели, которые не всегда учитывают реальную динамику старения компонентов в процессе эксплуатации. Для разработки эффективных стратегий предиктивного (прогностического) обслуживания необходимо детальное исследование статистических закономерностей возникновения отказов. Особую сложность представляет интерпретация эмпирических данных на различных этапах жизненного цикла устройств – от периода приработки до фазы интенсивного износа.

Фундаментальной основой анализа надежности сложных технических систем, к которым относятся устройства ЖАТ, является изучение законов распределения времени наработки на отказ. Классическая теория надежности выделяет три характерных периода в жизненном цикле оборудования: период приработки, характеризующийся наличием скрытых дефектов; период нормальной эксплуатации с относительно постоянной интенсивностью отказов; и период интенсивного износа. Традиционные подходы, использующие усредненные статистические показатели, зачастую не позволяют точно идентифицировать границы этих периодов для конкретных типов устройств, эксплуатируемых в специфических климатических условиях Казахстана. В этой связи, использование методов

математической аппроксимации эмпирических данных позволяет получить более гибкие модели, описывающие реальные процессы старения и деградации технических средств [4; 5].

Материалы и методы

Объектом исследования являются устройства ЖАТ, которые представляют собой совокупность технических средств, предназначенных для обеспечения безопасности и регулирования движения поездов. В современных условиях эксплуатации на железнодорожном транспорте Республики Казахстан системы ЖАТ проходят этап технологической трансформации, связанный с внедрением микропроцессорных технологий и интеллектуальных систем управления. Сложность архитектуры этих устройств и высокая ответственность за бесперебойность перевозочного процесса требуют точной оценки их технического состояния. В данной работе рассматриваются показатели надежности устройств и оборудования, эксплуатируемого в условиях реального воздействия внешних факторов, что позволяет объективно оценить динамику его старения и деградации в процессе наработки.

В рамках данной работы исследование базируется на методах математической аппроксимации эмпирических данных, полученных в ходе эксплуатации оборудования. Методология подразумевает детальное изучение различных этапов жизненного цикла устройств – от периода приработки до фазы интенсивного износа – с целью идентификации точных границ этих периодов. Использование методов математической аппроксимации позволяет получить гибкие модели, описывающие реальные процессы старения и деградации технических средств в специфических климатических условиях Казахстана.

К числу наиболее широко применяемых количественных критериев надежности для восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем и элементов, к которым на этапе первичного анализа относятся узлы устройств ЖАТ, принадлежат: вероятность безотказной работы, вероятность отказа, частота (плотность) отказов, интенсивность отказов и средняя наработка до первого отказа [6].

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа. В теоретическом виде она определяется уравнением:

$$P(t) = P(T \geq t) \quad (1)$$

где t – время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы; T – время работы устройства системы от его включения до первого отказа.

Для обработки данных эксплуатации используется статистическая оценка вероятности безотказной работы, определяемая выражением:

$$P^*(t) = \frac{[N_0 - n(t)]}{N_0} \quad (2)$$

где N_0 – число изделий в начале испытаний; $n(t)$ – число отказавших изделий за время t .

Параллельно с этим, для оценки распределения отказов во времени используется статистическая плотность распределения $f(t)$ и интенсивность отказов $\lambda^*(t)$, которые рассчитываются для каждого интервала наработки [7]:

$$f^*(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_0 \Delta t_i}$$

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{оп} \Delta t_i} \quad (3) \quad (4)$$

Эмпирической базой исследования послужили эксплуатационные данные о наработках электромагнитных реле ЖАТ, представленные в виде вариационного ряда. В качестве исходных данных рассматривался массив наблюдений за отказами оборудования на временном интервале до 1500 часов с фиксированным шагом анализа в 100 часов (таблица 1). Такой подход позволил обеспечить необходимую дискретность данных для последующей математической аппроксимации.

Таблица 1 – Массив наблюдений за отказами

Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$
0-100	13	500-600	9	1000-1100	7
100-200	11	600-700	8	1100-1200	8
200-300	12	700-800	8	1200-1300	10
300-400	10	800-900	7	1300-1400	11
400-500	10	900-1000	7	1400-1500	14

Для реализации математической модели и проведения численного анализа был выбран современный стек инструментов автоматизированной обработки данных. Вычисления проводились в облачной интерактивной среде Google Colab, которая базируется на Jupyter Notebook и предоставляет удаленный доступ к вычислительным мощностям, что гарантирует высокую точность обработки данных и исключает погрешности, характерные для ручного счета. В качестве основного инструментария использовался

высокоуровневый язык программирования Python с привлечением специализированных библиотек для анализа данных и визуализации [8; 9].

В частности, библиотека Pandas применялась для структурной обработки вариационного ряда наработок, выполнения операций очистки данных и автоматизированного расчета показателей вероятности безотказной работы, плотности и интенсивности отказов для каждого временного интервала. Визуализация полученных результатов и построение графических зависимостей осуществлялись с помощью библиотеки Matplotlib, что позволило провести динамическую аппроксимацию и наглядно идентифицировать «зону износа» оборудования на основе рассчитанных массивов данных. Совместное использование этих инструментов обеспечило высокую точность вычислений и позволило выявить критическую точку перехода системы в фазу интенсивного физического старения [10].

Результаты и обсуждения

Для количественной оценки надежности исследуемых устройств ЖАТ и определения границ их безотказной работы на основе собранных эксплуатационных данных был произведен расчет статистических показателей. В ходе анализа вычислялись значения вероятности безотказной работы $P^*(t)$, плотности распределения отказов $f^*(t)$ и интенсивности отказов $\lambda^*(t)$ для различных временных интервалов с шагом 100 часов. Полученные результаты, представленные в таблице 2, позволяют не только проследить общую динамику деградации компонентов, но и математически зафиксировать момент перехода системы из состояния нормальной эксплуатации в фазу интенсивного износа.

Таблица 2 – Результаты вычисленных характеристики

$\Delta t, \text{ ч}$	$P^*(t)$	$f^*(t) \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч}$	$\lambda^*(t) \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч}$
0-100	0,94	0,513	0,527
100-200	0,905	0,434	0,469
200-300	0,857	0,474	0,538
300-400	0,818	0,395	0,471
400-500	0,778	0,395	0,495
500-600	0,743	0,355	0,467
600-700	0,711	0,316	0,434
700-800	0,679	0,316	0,454
800-900	0,652	0,276	0,415
900-1000	0,624	0,276	0,433
1000-1100	0,596	0,276	0,453
1100-1200	0,565	0,316	0,544

1200-1300	0,525	0,395	0,724
1300-1400	0,482	0,434	0,862
1400-1500	0,426	0,553	1,212

На основе обработки вариационного ряда наработок (таблица 2) в среде Google Colab путем применения библиотек *pandas* и *matplotlib* были получены графические зависимости, характеризующие динамику изменения надежности устройств ЖАТ в процессе эксплуатации.

Представленная зависимость вероятности безотказной работы $P^*(t)$ от времени наработки (рисунок 1) демонстрирует стабильное снижение надежности устройств ЖАТ на всем рассматриваемом интервале до 1500 часов. Характер кривой подтверждает высокую интенсивность деградиционных процессов: если в начальный период (до 100 ч) показатель сохраняется на уровне 0,940, то к моменту достижения критической отметки в 1100 часов вероятность снижается до 0,596. Дальнейший наклон графика после точки 1150 часов становится более крутым, что визуализирует ускоренный износ оборудования и подтверждает нецелесообразность его эксплуатации без проведения ремонтных работ при значениях $P^*(t)$ ниже 0,5-0,6.

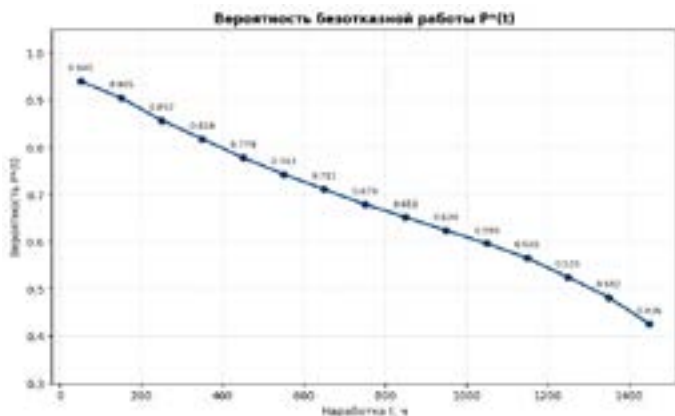


Рисунок 1 – Вероятность безотказной работы

Анализ гистограммы плотности распределения отказов $f^*(t)$ (рисунок 2) позволяет детализировать интенсивность потока отказов на различных этапах эксплуатации. В интервале наработки от 100 до 1100 часов наблюдается постепенное снижение плотности с 0,434 до минимального значения 0,276, что соответствует периоду стабильной работы оборудования с минимальным

риском возникновения дефектов. Однако после прохождения точки 1100 часов характер распределения качественно меняется: фиксируется резкий рост плотности до 0,553 к концу рассматриваемого периода (1500 ч). Данный всплеск на гистограмме наглядно подтверждает завершение периода нормальной эксплуатации и вступление технических средств ЖАТ в фазу массовых отказов, обусловленных физическим износом и старением элементной базы.



Рисунок 2 – Плотность распределения отказов

Наиболее информативным индикатором технического состояния устройств ЖАТ является график интенсивности отказов $\lambda^*(t)$ (рисунок 3). В интервале от 0 до 1100 часов кривая характеризуется стабильностью с незначительными колебаниями в пределах 0,415-0,538, что соответствует периоду нормальной эксплуатации с доминированием случайных отказов. Однако после прохождения точки излома на рубеже 1100-1150 часов наблюдается резкий, практически экспоненциальный рост показателя: значение $\lambda^*(t)$ увеличивается с 0,453 (интервал 1000-1100 ч) до 1,212 к моменту наработки 1500 часов. Вхождение графика в выделенную «Зону износа» (после 1100 ч) математически обосновывает необходимость изменения стратегии обслуживания: переход от фиксации отказов к предиктивной замене узлов до достижения ими данного временного порога.

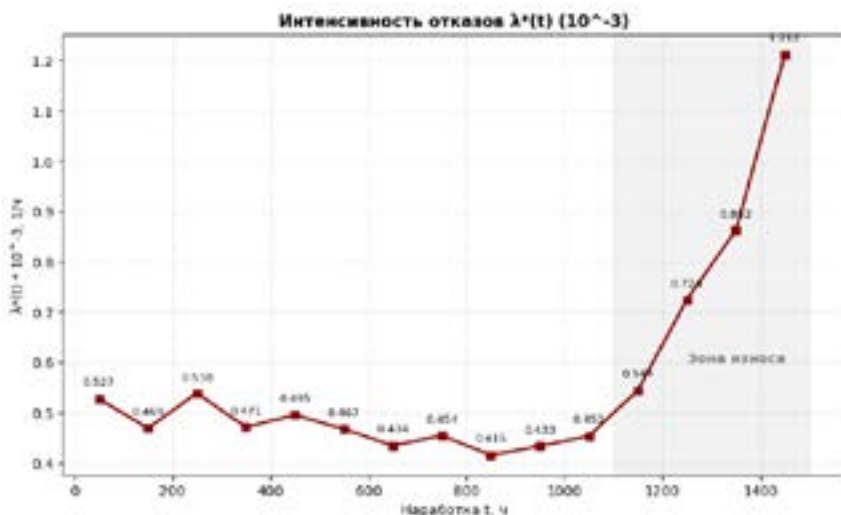


Рисунок 3 – Интенсивность отказов

Комплексное сопоставление динамики расчетных показателей $P^*(t)$, $f^*(t)$ и $\lambda^*(t)$ позволяет с высокой степенью достоверности идентифицировать жизненный цикл исследуемых устройств ЖАТ. Резкая смена показания на всех представленных графиках в интервале 1100-1150 часов указывает на исчерпание запаса надежности и переход системы в нестабильное состояние, характеризующееся ускоренным износом. Если до этого порога интенсивность отказов $\lambda^*(t)$ сохраняется на относительно низком уровне (не превышая 0,538), то последующий рост плотности распределения отказов $f^*(t)$ в сочетании с падением вероятности безотказной работы ниже критической отметки 0,6 свидетельствует о неэффективности традиционных стратегий технического обслуживания по состоянию. Таким образом, полученные эмпирические зависимости формируют объективную базу для перехода к предиктивной модели эксплуатации, где основной объем восстановительных работ должен быть завершён до достижения оборудованием наработки в 1100 часов.

Выводы

Проведенный статистический анализ эксплуатационных данных позволил установить, что критический порог наработки для исследуемых устройств ЖАТ находится в диапазоне 1100-1150 часов. До достижения этой отметки система функционирует в режиме нормальной эксплуатации, однако после ее прохождения фиксируется резкая смена показателей

всех показателей надежности. В частности, интенсивность отказов $\lambda^*(t)$ демонстрирует практически экспоненциальный рост, увеличиваясь к 1500 часам наработки в 2,6 раза по сравнению с периодом стабильной работы. Параллельно с ростом интенсивности отказов наблюдается существенное снижение эксплуатационной пригодности оборудования. Вероятность безотказной работы $P^*(t)$ к моменту достижения наработки в 1500 часов падает до уровня 0,426, что является критическим показателем для систем автоматики, непосредственно влияющих на безопасность движения поездов. Характер изменения плотности распределения отказов $f^*(t)$ дополнительно подтверждает, что именно после 1100 часов механизмы физического старения и деградации компонентов начинают превалировать над случайными факторами. В качестве практической значимости исследования обоснована необходимость трансформации системы технического обслуживания. Полученные зависимости указывают на целесообразность перехода к предиктивной модели эксплуатации, в рамках которой основной комплекс планово-предупредительных мероприятий должен быть завершен до достижения оборудованием наработки в 1100 часов. Интеграция данных математических моделей в цифровые системы мониторинга позволит автоматизировать процесс прогнозирования остаточного ресурса и минимизировать риски возникновения внезапных отказов в транспортной отрасли.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Национальный план развития Республики Казахстан до 2029 года : утв. Указом Президента Республики Казахстан от 30 мая 2024 года № 563. – Астана: Акорда, 2024.

2 Концепция цифровой трансформации, развития отрасли информационных технологий и кибербезопасности на 2023-2029 годы: утв. постановлением Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 269. – Астана, 2023.

3 Концепция развития транспортно-логистического потенциала Республики Казахстан до 2030 года: утв. постановлением Правительства Республики Казахстан от 30 декабря 2022 года № 1129. – Астана, 2022.

4 **Сапожников, В. В.** Основы теории надежности и технической диагностики: учебник / В. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – СПб. : Лань, 2019. – 588 с.

5 **Баженов, Ю. В.** Основы надежности и работоспособности технических систем: учеб. пособие / Ю. В. Баженов, М. Ю. Баженов; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2017. – 267 с.

6 **Dimitrova, E., Dimitrov, V.** Methodology for Studying the Reliability of Interlocking Devices in Bulgarian Railways // Appl. Sci. – 2025. – № 2(15). – P. 4178–4189

7 **Kumar, N., Tee, K.F.** Reliability and Inspection Modelling of Railway Signalling Systems // Modelling. – 2021. – № 2. – P. 344–354

8 **Virtanen, P.** SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. – 2020. – Vol. 17. – P. 261–272.

9. **Bisong, E.** Google Colaboratory / E. Bisong // Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform. – Berkeley, CA : Apress, 2019. – P. 59–64.

10 **Вандер Плас, Дж.** Python для работы с данными: наука о данных и машинное обучение / Дж. Вандер Плас; пер. с англ. А. А. Слинкина. – 2-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2023. – 576 с.

REFERENCES

1 Nacional'nyj plan razvitiya Respubliki Kazahstan do 2029 goda [National Development Plan of the Republic of Kazakhstan until 2029]: utv. Ukazom Prezidenta Respubliki Kazahstan ot 30 maya 2024 goda № 563. – Astana: Akorda, 2024.

2 Konceptiya cifrovoj transformacii, razvitiya otrasli informacionnyh tekhnologij i kiberbezopasnosti na 2023-2029 gody [Concept of Digital Transformation, Development of the Information Technology Industry and Cybersecurity for 2023–2029]: utv. postanovleniem Pravitel'stva Respubliki Kazahstan ot 28 marta 2023 goda № 269. – Astana, 2023.

3 Konceptiya razvitiya transportno-logisticheskogo potenciala Respubliki Kazahstan do 2030 goda [Concept for the Development of the Transport and Logistics Potential of the Republic of Kazakhstan until 2030]: utv. postanovleniem Pravitel'stva Respubliki Kazahstan ot 30 dekabrya 2022 goda № 1129. – Astana, 2022.

4 **Sapozhnikov, V. V.** Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki [Fundamentals of Reliability Theory and Technical Diagnostics]: uchebnik / V. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov. – SPb.: Lan', 2019. – P. 588 .

5 **Bazhenov, YU. V.** Osnovy nadezhnosti i rabotosposobnosti tekhnicheskikh sistem [Fundamentals of Reliability and Operability of Technical Systems]: ucheb. posobie / YU. V. Bazhenov, M. YU. Bazhenov; Vladim. gos. un-t im. A. G. i N. G. Stoletovyh. – Vladimir : Izd-vo Vladim. gos. un-ta, 2017. – P. 267.

6 **Dimitrova, E., Dimitrov, V.** Methodology for Studying the Reliability of Interlocking Devices in Bulgarian Railways // Appl. Sci. – 2025. – № 2(15). – P. 4178–4189

7 **Kumar, N., Tee, K.F.** Reliability and Inspection Modelling of Railway Signalling Systems // Modelling. – 2021. – № 2. – P. 344–354

8 **Virtanen, P.** SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. – 2020. – Vol. 17. – P. 261–272.

9 **Bisong, E.** Google Colaboratory / E. Bisong // Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform. – Berkeley, CA : Apress, 2019. – P. 59–64.

10. **Vander Plas, Dzh.** Python dlya raboty s dannymi: nauka o dannyh i mashinnoe obuchenie [Python Data Science Handbook: Essential Tools for Working with Data] / Dzh. Vander Plas; per. s angl. A. A. Slinkina. – 2-e izd. – Sankt-Peterburg: Piter, 2023. – P. 576.

Поступило в редакцию 16.01.26.

Поступило с исправлениями 12.02.26.

Принято в печать 03.06.26.

*А. Е. Касымова¹, Н. Т. Карымсакова²

^{1,2}М. Тынышпаев атындағы АЛТ университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

16.01.26 ж. баспаға түсті.

12.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

03.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

СТАТИСТИКАЛЫҚ ІСТЕН ШЫҒУ СИПАТТАМАЛАРЫН АППРОКСИМАЦИЯЛАУ АРҚЫЛЫ ТЕМІРЖОЛ АВТОМАТИКАСЫ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНЫҢ СЕНІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Мақала предиктивті техникалық қызмет көрсетуге қошу жағдайында теміржол автоматикасы және телемеханика (ТЖАТ) жүйелерінің пайдалану сенімділігін бағалауға арналған. Жұмыстың мақсаты – іркілістердің статистикалық сипаттамаларын аппроксимациялау негізінде құрылғылардың жұмыс істеуінің критикалық уақыт аралықтарын анықтау. Зерттеу барысында 1500 сағатқа дейінгі аралықта іркіліссіз жұмыс істеу ықтималдығы $P^(t)$, іркілістердің таралу тығыздығы $f^*(t)$ және іркілістер қарқындылығына $\lambda^*(t)$ есептеулер жүргізілді. Алынған эмпирикалық мәліметтер мен салынған графиктерді талдау 1100-1150 сағат диапазонында жүйенің қалыпты пайдалану кезеңінен қарқынды*

тозу фазасына өтуін сипаттайтын сыну нүктесін анықтауға мүмкіндік берді. 1100 сағаттық межеден асқаннан кейін іркілістер қарқындылығы 2,6 есе артып, кезеңнің соңына қарай 1,212 мәніне жететіні, ал іркіліссіз жұмыс ықтималдығы 0,426-ға дейін төмендейтіні анықталды. 1100 сағаттық меже жоспарлы-алдын алу жөндеу жұмыстарын жүргізу үшін оңтайлы мерзім болып табылады деген қорытынды жасалды. Жұмыстың практикалық маңыздылығы көлік инфрақұрылымын цифрландыру аясында ТЖАТ жабдықтарының қалдық ресурсын болжау үшін алынған тәуелділіктерді пайдалану мүмкіндігінде, бұл пойыз қозғалысының қауіпсіздігін айтарлықтай арттыруға және пайдалану шығындарын оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: теміржол автоматикасы және телемеханикасы, сенімділік, тозу, істен шығу қарқындылығы, критикалық жұмыс уақыты.

**A. Kassymova¹, N. Karymsakova²*

^{1,2}ALT University named after M. Tynyshpaeva,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 16.01.26.

Received in revised form 12.02.26.

Accepted for publication 03.06.26.

RELIABILITY ASSESSMENT OF RAILWAY AUTOMATION DEVICES VIA APPROXIMATION OF STATISTICAL FAILURE CHARACTERISTICS

The article is devoted to the operational reliability assessment of railway automation and remote control (RARC) systems during the transition to predictive maintenance. The study aims to determine critical operating time intervals based on the approximation of statistical failure characteristics. During the research, the probability of fault-free operation $P^(t)$, failure density $f^*(t)$, and failure rate $\lambda^*(t)$ were calculated for an interval up to 1500 hours. Analysis of the obtained empirical data and plotted graphs identified a break point in the range of 1100-1150 hours, signifying the system's transition from normal operation to the intensive wear phase. It was established that after exceeding the 1100-hour threshold, the failure rate increases 2.6 times, reaching 1.212 by the end of the period, while the probability of fault-free operation drops*

to 0,426. It is concluded that the 1100-hour milestone is the optimal deadline for preventive maintenance. The practical significance lies in using the obtained dependencies to predict the residual life of RARC equipment within the digitalization of transport infrastructure, significantly improving traffic safety and optimizing operating costs.

Keywords: interval control, semi-automatic blocking, automatic blocking, radio-based blocking, Trans-Caspian route, throughput capacity.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz