

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 2, 2025 vol. 2

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 2, ISSUE 2

JUNE, 2025



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 2, ISSUE 2 JUNE, 2025

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Analysis of failures of components in a complex of backup power sources for signaling and communication devices on a railway section using the Petri net and Monte Carlo method

N. Yaronova¹^a, A. Ablayeva¹^b

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract: This article presents an integrated approach to the reliability analysis of a backup power supply system for signaling and communication devices in railway transport. The model includes batteries, diesel generators, and alternative energy sources. A Petri net is used to analyze the logic of operation and switching between power sources, providing a visual representation of the system's structure and revealing potential conflicts. The Monte Carlo method is employed to quantitatively assess the system's reliability under various conditions. The simulation results demonstrate the impact of individual component failures on the overall stability of the system and help identify the most vulnerable elements, which is essential for subsequent optimization and improving the overall reliability of the power supply in railway infrastructure.

Keywords: power supply, Petri net, Monte Carlo method, reliability, backup sources

Анализа отказов компонентов комплекса резервных источников электропитания устройств сигнализации и связи на железнодорожном участке с помощью сети Петри и метода Монте-Карло

Н. Яронова¹^a, А. Аблаева¹^b

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация: В данной статье представлен интегрированный подход к анализу надежности системы резервного электропитания устройств сигнализации и связи на железнодорожном транспорте. В модели учтены аккумуляторные батареи, дизельные генераторы и альтернативные источники энергии. Для анализа логики функционирования и переключения между источниками используется сеть Петри, позволяющая визуализировать структуру и выявить потенциальные конфликты в работе системы. Оценка вероятности отказов проводится методом Монте-Карло, что позволяет количественно определить уровень надежности системы при различных параметрах. Результаты моделирования демонстрируют влияние отказов отдельных компонентов на устойчивость всей системы и дают возможность выявить наиболее уязвимые звенья, что важно для последующей оптимизации и повышения общей надежности энергоснабжения на объектах железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: электропитание, сеть Петри, метод Монте-Карло, надежность, резервные источники.

1. Введение

Эффективное управление системой электропитания имеет ключевое значение для обеспечения стабильности и надежности сложных технических объектов, таких как системы железнодорожной сигнализации и связи. Перебои в подаче энергии могут привести к отказам критически важных компонентов, увеличению времени простоя, нарушению графика движения поездов и, как следствие, к значительным экономическим убыткам и рискам для безопасности пассажиров.

Для повышения устойчивости таких систем повсеместно внедряются резервные схемы

электропитания, включающие аккумуляторные батареи, дизельные генераторы, а в ряде случаев – и альтернативные источники энергии (например, солнечные панели). Однако успешная эксплуатация резервных источников требует не только физического наличия оборудования, но и интеллектуальной системы управления, способной в режиме реального времени координировать переключения, отслеживать состояние компонентов и предсказывать возможные отказы.

Одной из ключевых задач в этой области является разработка и внедрение методов, позволяющих моделировать сложные процессы переключения между источниками питания, оценивать вероятность отказов и обеспечивать своевременное реагирование. В последние годы особое внимание уделяется сочетанию

^a <https://orcid.org/0000-0003-1781-5997>

^b <https://orcid.org/0000-0002-7713-1602>



графических и имитационно-статистических методов. В частности, сети Петри зарекомендовали себя как эффективный инструмент для визуализации логики функционирования систем с параллельными и последовательными процессами. Они позволяют отразить взаимосвязи между элементами системы, выявить потенциальные конфликты, тупиковые состояния и определить оптимальные алгоритмы переключения. Метод Монте-Карло, основанный на многократном случайном моделировании, предоставляет возможность количественно оценить надёжность системы, учитывая вероятностную природу отказов компонентов, временные параметры и статистику эксплуатации. Совместное применение этих методов позволяет охватить как структурно-логическую, так и стохастическую природу функционирования системы электропитания [1].

Настоящая работа предлагает интегрированный подход, основанный на объединении сети Петри и метода Монте-Карло, для анализа надёжности резервных систем электропитания, используемых в системах сигнализации и связи на железнодорожном транспорте. Такой подход позволяет не только моделировать структуру и поведение системы в различных режимах работы, но и проводить оценку вероятности отказа на основе реальных статистических данных.

Предложенная методология обладает высокой универсальностью и применимостью не только в железнодорожной отрасли, но и в других сферах, где требуются высокие показатели надёжности и отказоустойчивости – энергетике, телекоммуникациях, промышленной автоматике и критически важных объектах инфраструктуры.

2. Методика исследования

Сеть Петри - это математический и графический инструмент, который часто используется для моделирования систем с параллельными и последовательными процессами. В данном случае, сеть Петри можно использовать для моделирования алгоритма переключения источников питания для системы электропитания железнодорожных систем сигнализации и связи [2].

Работа системы представлен следующим образом: система получает питание от основного источника (аккумулятор или дизельный генератор). В случае отказа основного источника система переключается на альтернативный источник. При восстановлении основного источника питание возвращается к нему.

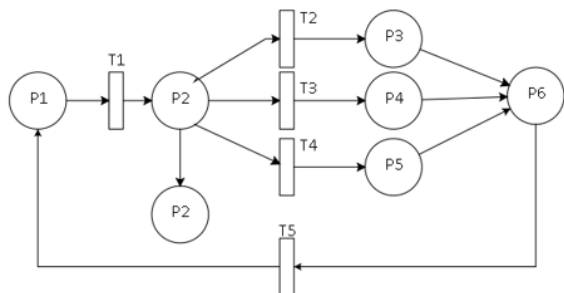


Рис. 1. Сеть Петри системы управления электропитанием устройств сигнализации и связи

На рис. 1. представлена сеть Петри, иллюстрирующая процесс управления системой электропитания устройств сигнализации и связи на железнодорожном транспорте.

Основные компоненты сети Петри для представленной системы:

- места (Places) – состояния системы, например, «Основной источник питания включен», «Аккумулятор готов», «Солнечная энергия доступна» и т.д.;
- переходы (Transitions) – события, которые инициируют изменения состояния, например, «Отключение основного питания», «Переключение на аккумулятор», «Переключение на альтернативный источник» и т.д.;
- дуги (Arcs) – связи, которые соединяют места и переходы, определяя последовательность событий.

Определение мест: P1 - основной источник питания включен; P2 - основной источник питания отключен; P3 - аккумулятор готов к использованию; P4 - дизель-генератор готов к использованию; P5 - альтернативный источник (солнечная или ветровая энергия) доступен; P6 - система сигнализации и связи получает питание.

Определение переходов: T1 - отключение основного источника питания; T2 - переключение на аккумулятор; T3 - переключение на дизель-генератор; T4 - переключение на альтернативный источник (солнечную или ветровую энергию); T5 - восстановление основного источника питания.

Схема работы сети Петри

1. Начальное состояние. Метка находится в P1 (основной источник питания включен).

2. Отключение основного источника. Если основной источник отключается, метка перемещается в P2 через переход T1.

3. Переключение на запасные источники:

- если метка находится в P2 и аккумулятор готов (P3), то происходит переход T2, и метка перемещается в P6, обеспечивая питание от аккумулятора;

- если аккумулятор не готов, система переходит к дизельному генератору через переход T3, и метка снова перемещается в P6;

- если ни аккумулятор, ни дизель-генератор недоступны, происходит переключение на альтернативный источник через T4, и метка перемещается в P6.

Использование сети Петри позволяет:

- наглядно показать последовательность и логику переключения источников питания;

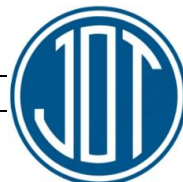
- проанализировать условия и конфликты, которые могут возникнуть при необходимости резервного питания;

- моделировать систему с учетом вероятности одновременных отказов разных компонентов и их влияния на стабильность питания [3-5].

Таким образом, сеть Петри помогает не только визуализировать алгоритм работы системы электропитания, но и проводить более детальный анализ устойчивости системы к отказам и оптимизировать процесс переключения источников.

3. Результаты исследования

Для моделирования отказов в системе электропитания железнодорожной сигнализации и связи



с использованием метода Монте-Карло можно выполнить следующий пошаговый анализ.

Предположим, что вероятность отказа каждого резервного компонента (аккумулятор, дизельный генератор и альтернативный источник энергии) является независимой. Если известны вероятности отказа для каждого компонента за один и тот же временной период, вероятность полного отказа всех источников резервного питания можно вычислить как произведение вероятностей отказа каждого компонента:

$$P_{\text{общ}} = P_A \cdot P_{\text{ДГ}} \cdot P_{\text{АИЭ}},$$

где P_A – вероятность отказа аккумулятора;

$P_{\text{ДГ}}$ – вероятность отказа дизельного генератора;

$P_{\text{АИЭ}}$ – вероятность отказа альтернативного источника энергии.

Метод Монте-Карло позволяет численно оценить вероятность полного отказа, проводя серию случайных испытаний. В каждом испытании определяется, работает ли каждый источник питания. Если все три источника одновременно выходят из строя, фиксируется отказ системы [6].

Параметры Симуляции:

- количество итераций симуляции: $N = 10000$ (для большей точности);

- для каждого источника генерируется случайное значение, и проверяется, превышает ли оно установленную вероятность отказа;

- определение вероятностей отказа. Вероятности отказов задаются для каждого резервного источника. Эти значения можно настроить в зависимости от реальных данных по надежности оборудования [7-9];

- инициализация симуляции методом Монте-Карло. Симуляция проводится на 10,000 итерациях. Чем больше итераций, тем точнее результаты.

Цикл симуляции:

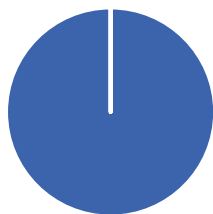
- для каждой итерации генерируется случайное значение (между 0 и 1) для каждого источника;

- если случайное значение для каждого источника меньше его вероятности отказа, это означает, что он вышел из строя;

- Если все три источника выходят из строя одновременно, это фиксируется как полный отказ системы.

Вероятность отказа рассчитывается как отношение количества отказов к общему числу итераций. Вероятность стабильной работы — как дополнение к вероятности отказа [10-14].

График с круговой диаграммой визуализирует вероятность отказа и стабильной работы системы представлен на рис 2.



■ Полный отказ системы ■ Стабильная работа

Рис. 2. Вероятность стабильной работы и полного отказа системы

Вероятность полного отказа системы – показывает вероятность того, что все источники резервного питания выйдут из строя одновременно. Вероятность стабильной работы системы – вероятность того, что хотя бы один из источников резервного питания продолжит работать [15].

Эта модель помогает оценить риски и, если вероятность отказа оказывается высокой, может побудить проектировщиков к пересмотру системы резервного питания.

Для визуализации зависимости вероятности отказа системы от различных параметров мы можем построить линейные графики, показывающие, как вероятность полного отказа системы меняется при изменении:

1. Вероятности отказа каждого компонента (например, аккумулятора, дизельного генератора или альтернативного источника);

2. Количество итераций в методе Монте-Карло для наглядного подтверждения устойчивости результатов.

На рис. 3 представлен график зависимости вероятности отказа системы от вероятности отказа каждого компонента, изменяя вероятность отказа одного из компонентов, фиксируя другие, для оценки влияния на общую вероятность. На рис. 3. ось X показывает вероятность отказа аккумулятора, ось Y показывает общую вероятность отказа системы.

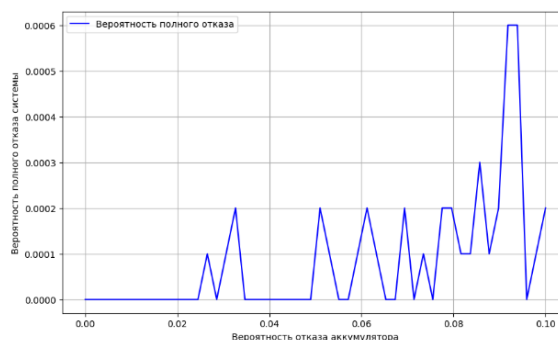


Рис. 3. График зависимости вероятности отказа системы от вероятности отказа каждого компонента

График демонстрирует, как увеличение вероятности отказа аккумулятора повышает общую вероятность отказа всей системы. Этот анализ можно повторить, изменяя другие компоненты (например, дизельный генератор или альтернативный источник) для исследования их влияния на стабильность системы. График позволит наглядно увидеть, как изменение вероятности отказа одного компонента влияет на вероятность полного отказа, что важно для оценки надежности системы.

Для наглядности изменения вероятности отказа каждого компонента (аккумулятор, дизельный генератор и альтернативный источник энергии) и влияния на общую вероятность отказа системы, укажем все компоненты на одном графике. На рис 4. видно, как вероятность отказа всей системы изменяется при варьировании вероятностей отказа каждого из компонентов по отдельности, в то время как другие остаются фиксированными.

На рис 4. ось X представляет вероятность отказа отдельного компонента (аккумулятора, дизельного генератора или альтернативного источника), ось Y показывает вероятность полного отказа системы при увеличении вероятности отказа данного компонента,

линии представляют влияние отказа каждого компонента на общую вероятность отказа системы.

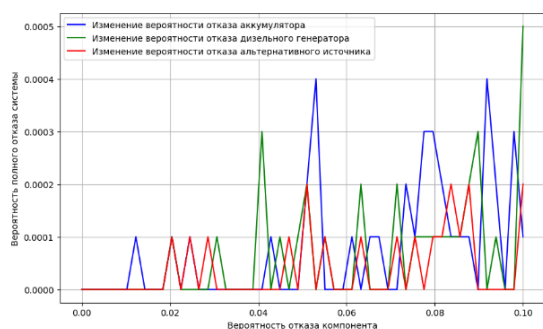


Рис. 4. График влияния отказов различных компонентов на надежность системы

Такой подход к визуализации позволяет сразу видеть, какой компонент оказывает большее влияние на отказ системы и при каких условиях, что важно для оптимизации надежности системы в целом.

4. Заключение

В данной работе представлен интегрированный подход к анализу отказоустойчивости систем резервного электропитания устройств сигнализации и связи на железнодорожных участках с использованием сети Петри и метода Монте-Карло. Предложенное решение позволило объединить графическую интерпретацию логики переключений источников питания и количественную оценку надёжности на основе вероятностных характеристик отказов компонентов.

Преимуществами разработанного подхода являются повышенная точность моделирования за счёт учета случайного характера отказов, гибкость анализа с возможностью моделирования различных сценариев функционирования системы, визуализация сложных процессов переключения между источниками питания с помощью сети Петри, что облегчает отладку алгоритмов управления, а также возможность интеграции в систему цифрового мониторинга, включая прогнозирование отказов и автоматическую коррекцию.

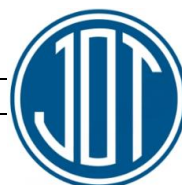
Сравнительный анализ с традиционными методами оценки надёжности (например, методами на основе дерева отказов или исключительно аналитических расчётов) показал, что предложенный подход позволяет снизить вероятность пропуска критических состояний системы, сократить затраты на тестирование за счёт имитационного моделирования и повысить обоснованность проектных решений в области резервного электропитания.

Новизна работы заключается в разработке интегрированного подхода к оценке надёжности резервных систем электропитания на основе одновременного применения сети Петри и метода Монте-Карло. Предложено совмещение структурной визуализации процессов переключения с вероятностным моделированием отказов, что позволяет не только выявлять потенциальные узкие места в архитектуре системы, но и количественно оценивать риски отказа при различных сценариях эксплуатации. Такой подход расширяет возможности традиционного

анализа и может быть адаптирован к другим критически важным объектам инфраструктуры.

Использованная литература / References

- [1] Jensen, K., Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use, Springer, 1997.
- [2] Rubinstein, R.Y., Kroese, D.P., Simulation and the Monte Carlo Method, Wiley, 2016.
- [3] Сидоров, А.В., Анализ отказов систем электропитания, Журнал энергетических систем, 2023.
- [4] Яронова Н.В., Аметова А.А. Сравнительный анализ аккумуляторных батареи для бесперебойного питания устройств автоматики и телемеханики, The scientific journal vehicles and roads, 2022 №2, стр 137-144
- [5] Яронова Н.В., Аметова А.А. Построение «smart» электросети с применением инновационных технологий // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2021. 9(90). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12289>
- [6] Трофимов, И.А., Лазарев, В.Н. Энергосбережение в транспортных системах: технологии и решения. Москва: Технопарк, 2017
- [7] Брагинский, М.В. Энергетика и транспорт: теория и практика. Москва: Транспорт, 2019.
- [8] Иванов, А.С., Кузнецов, П.В. Возобновляемые источники энергии в транспортной инфраструктуре. Санкт-Петербург: Наука, 2020.
- [9] Chen, X., Liu, H., Zhang, J. (2021). A reliability analysis method for renewable-based hybrid energy systems using improved Monte Carlo simulation. Renewable Energy, 172, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.123>
- [10] Al-Khafajiy, M., Baker, T., Asim, M. et al. (2020). Real-time fault-tolerant model for industrial IoT-based railway monitoring using Petri nets. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16(12), 7652–7662. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2987562>
- [11] Иванов, А. С., Кузнецов, П. В. Возобновляемые источники энергии в транспортной инфраструктуре. Санкт-Петербург: Наука, 2020.
- [12] Smith, J., Brown, L. Renewable Energy Integration in Rail Systems. Renewable Energy Journal, 2021, Vol. 35, No. 3, pp. 210-223.
- [13] Тихонов, Ю. В. Модели и алгоритмы управления энергопотреблением на транспорте. Новосибирск: Сибтех, 2018.
- [14] World Energy Council. Global Energy Transformation: Renewable Energy and Rail. Report, 2022.
- [15] Qi, J., Lu, X., Zhang, H. (2022). Reliability optimization in smart railway energy systems considering renewable uncertainty. Energy Reports, 8, 1234–1243. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.110>



**Информация об авторах/
Information about the authors**

Natalya Valerevna Yaronova
Tashkent State Transport University,
Ph.D. in Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of
"Radioelectronic Devices and Systems"
Email: yaronova_n@tstu.uz
Tel.: +99890 966 91 89
<https://orcid.org/0000-0003-1781-5997>

Aliye
Ayderovna
Ablayeva

Tashkent State Transport University,
postgraduate student of The
"Radioelectronic Devices and Systems"
Department
Email: aliewka4703@mail.ru
Tel.: +99897 403 42 20
<https://orcid.org/0000-0002-7713-1602>



B. Sindorov

The importance of the supervisory board in the implementation of effective corporate governance principles in the management of industrial enterprises49

E. Jonikulov, R. Ayapbergenov, H. Salohiddinov, K. Fayzullaev

Analysis of wireless communication technologies in the control and monitoring of railway station switches53

D. Yuldoshev, K. Matrasulov

Analysis of methods for assessing the state of urban public transport infrastructure based on logistics principles59

N. Yaronova, A. Ablayeva

Analysis of failures of components in a complex of backup power sources for signaling and communication devices on a railway section using the Petri net and Monte Carlo method64

O. Shavkatov

Study of technical maintenance and repair documentation for medical equipment69

A. Bondarenko, K. Lesov, T. Salakhov, M. Kenjaliev

Stability assessment of continuous welded railway with Vossloh fastenings using the finite element method73

M. Kabulov

The current state of terminal and logistics technology in Uzbekistan and its development78