

УДК 656.25

**С. В. Бушуев, канд. техн. наук,
А. Н. Попов, канд. техн. наук,
С. В. Стюков**

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Уральский государственный университет путей сообщения

ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УЩЕРБА ДЛЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА В МЕТРОПОЛИТЕНАХ ПРИ ОТКАЗАХ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Определение влияния отказов устройств автоматики на потери в процессах перевозок для существующих экономических условий является одной из актуальных задач, решение которой позволит усовершенствовать технологию обслуживания и выработать принципиально новые подходы к оборудованию станций и перегонов устройствами автоматики. Применительно к магистральному железнодорожному транспорту данную задачу позволяют решать методология управления ресурсами, рисками и анализа надежности и подход, при котором применяется имитационное моделирование.

Благодаря имитационному моделированию получены выборки показателей работы станции, такие как средний простой вагонов и суммарная задержка. В результате наличия случайной составляющей в расписании приема и отправления поездов, а также в продолжительности выполнения технологических операций показатели работы станции также имеют случайный характер. Нельзя говорить об однозначном увеличении технологических потерь при возникновении отказа устройств железнодорожной автоматики и телемеханики из-за значительного влияния колебаний потока поездов и решений оперативного управленческого персонала. Предложенная методика позволяет оценить вероятность увеличения потерь и риск экономических потерь связанных с отказом.

имитационное моделирование; простой вагонов; суммарные задержки; технологические потери; устройства автоматики

Введение

Применительно к магистральному железнодорожному транспорту доминирующим направлением решения задачи определения влияния отказов устройств автоматики на потери в процессах перевозок стала методология управления ресурсами, рисками и анализа надежности (УРРАН) [1–6], согласно которой предлагается рассчитывать показатели надежности исходя из допустимых значений двух комплексных показателей:

– коэффициента готовности, характеризующего безотказность и ремонтпригодность системы или устройства железнодорожной автоматики и телемеханики;

– величины издержек, обусловленных отказами средств железнодорожной автоматики и телемеханики на участке в течение планируемого периода.

Другой подход – строгая оптимизация на основе оригинальной модели динамической полнопотоковой задачи [7]. Она позволяет найти компромисс между затратами на совершенствование систем железнодорожной автоматики и телемеханики с целью снижения вероятности выхода из строя и возможным эффектом от снижения технологического ущерба при отказе. При этом может быть учтено множество ограничений временных и финансовых ресурсов для выполнения мероприятий.

Одной из ключевых проблем для обоих подходов к оптимизации затрат на модернизацию и эксплуатацию систем железнодорожной автоматики и телемеханики является оценка реального технологического ущерба при выходе из строя тех или иных элементов инфраструктуры.

В работах [8–14] показано, что имитационное моделирование является наиболее подходящим инструментом к исследованию транспортных систем.

Транспортная система – объект нелинейный, имеет сильную структурную и функциональную связность и трудно поддается расчету. Опыт исследования транспортных систем позволил выработать четыре основных подхода к их расчету:

- аналитический метод;
- графический метод;
- теория массового обслуживания;
- имитационное моделирование.

Наиболее полно все основные свойства транспортных систем из четырех подходов отображает имитационное моделирование (рис. 1).

Действительно, имитационная модель, компьютерная модель, подробно отображает структуру и технологию работы объекта, позволяет проводить эксперименты в условиях, близких к реальности, и получить необходимый для оценки исследуемого объекта набор параметров.

1 Определение показателей для оценки влияния отказов

Рассмотрим метод определения технологического ущерба на примере магистрального железнодорожного транспорта, который путем замены системы имитационного моделирования может быть, по мнению авторов, успешно применен и для условий метрополитенов.

В настоящее время наиболее развитой в функциональном и сервисном отношении является имитационная система ИСТРА, представляющая собой систему моделирования, которая позволяет рассчитывать технические и технологические параметры систем железнодорожного транспорта.

Структура	1	2	3	4
Технология	1	2	3	4
Случайные процессы	1	3	3	2
Управление	1	2	3	4
	Имитационное моделирование	Графический метод	Аналитический метод	Теория массового обслуживания

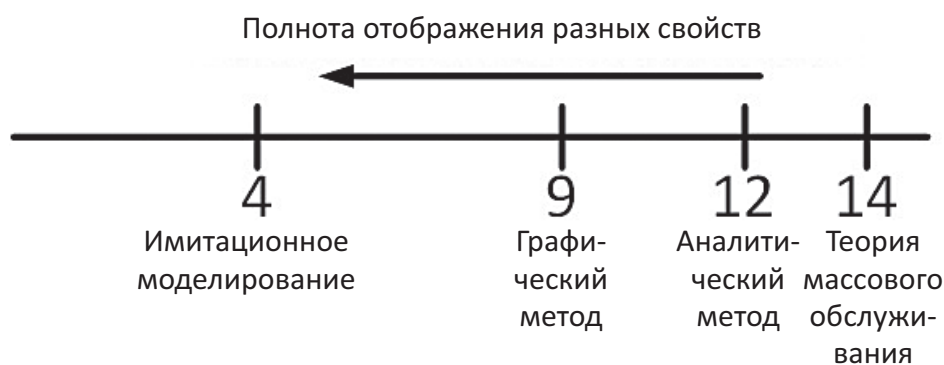


Рис. 1. Полнота отображения свойств транспортных систем

Чтобы максимально адекватно определить влияние отказов средств железнодорожной автоматики и телемеханики необходимо выбрать критерий, по которому следует оценивать технологические потери.

Задержка, которую вызывает отказавший элемент, не показывает общей картины экономического ущерба, так как во время технологического «окна» нагрузка и потери перераспределяются между остальными элементами инфраструктуры, и их также надо учитывать (рис. 2).

Поэтому наиболее полно потери отображают глобальные параметры работы станции, такие как средний простой вагона и суммарная задержка из-за всех элементов. Средний простой вагона – время нахождения вагона на станциях под грузовыми или техническими операциями или в ожидании этих операций. Суммарная задержка характеризует только ожидание операций, показывая тем самым только непроизводительные потери при работе станции. В результате влияния вероятностного характера перерабатываемого потока и времени выполнения технологических операций, а также управляющих

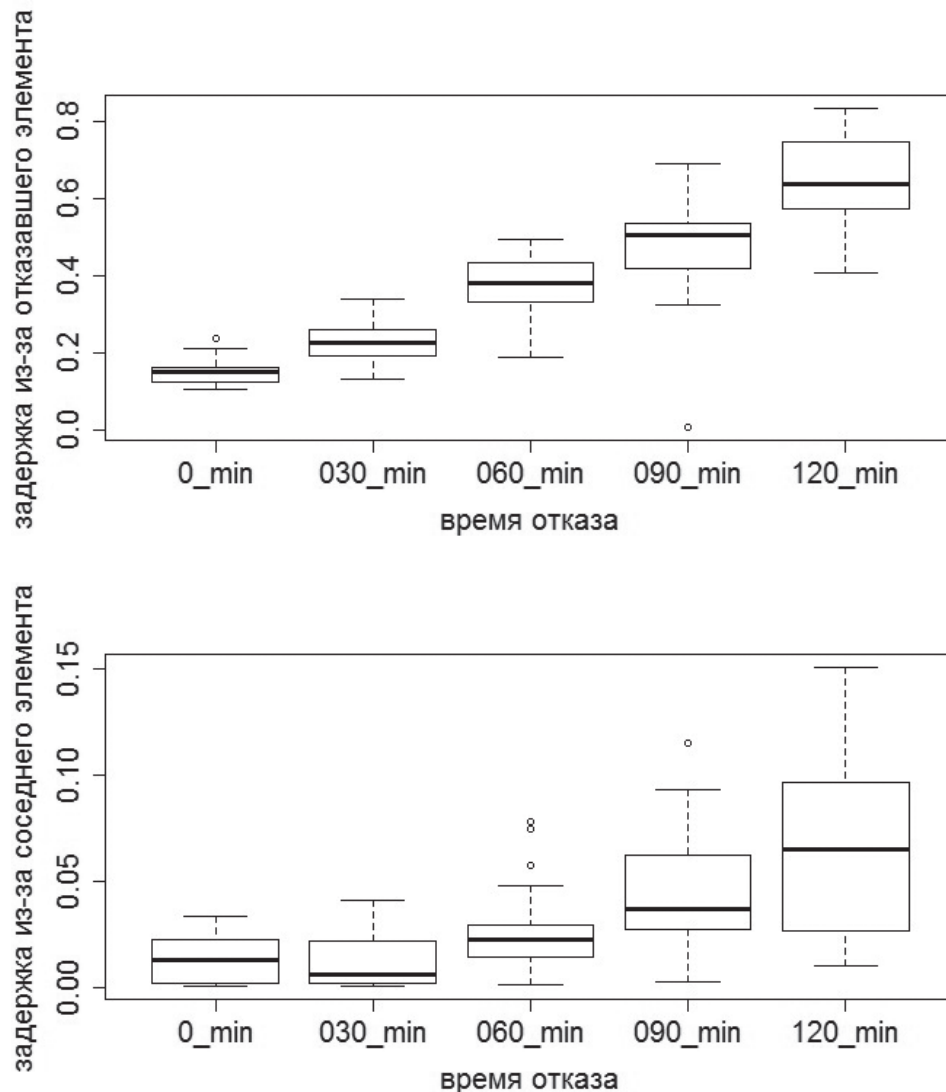


Рис. 2. Увеличение задержек из-за соседнего с отказавшим элемента

воздействий на технологические процессы между показателями «средний простой вагона» и «суммарная задержка» нет прямой функциональной связи, но существует высокая корреляция (рис. 3).

Таким образом, именно суммарная задержка является наиболее информативным показателем для оценки влияния отказов железнодорожной автоматики и телемеханики на величины технологических потерь. Сильная структурная и функциональная связанность элементов станции приводит к тому, что задержки существуют всегда, даже когда все устройства исправны. Поэтому потери от отказов будет показывать разность задержек, возникающих в пределах исследуемого объекта (станции), до и после отказа. В то же время влияние возникшего отказа в некоторых случаях (при наличии резервных путей выполнения технологической операции) может быть полностью исключено, а изменение фактического ритма подвода поездов для переработки

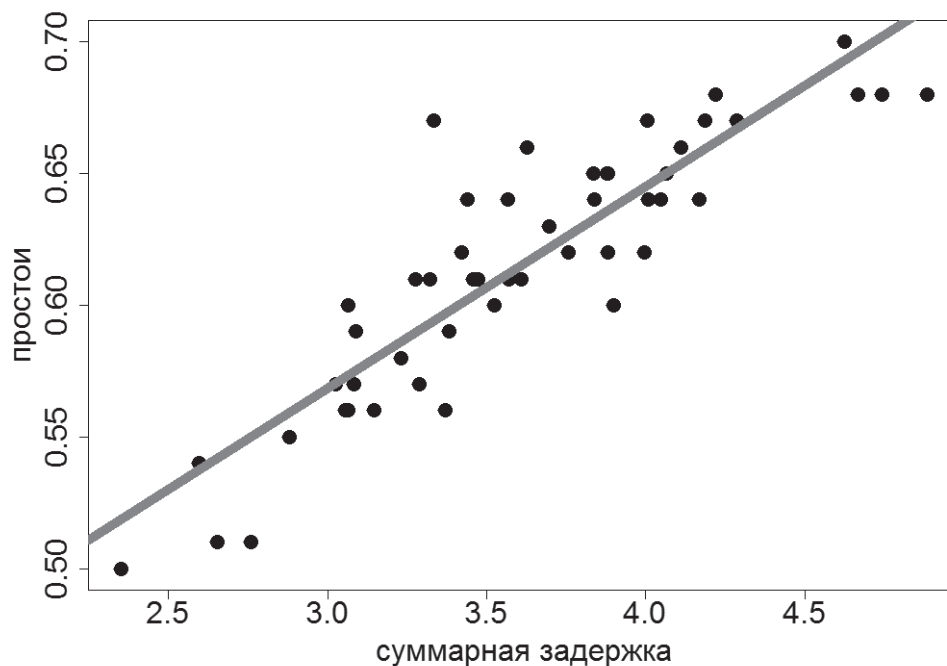


Рис. 3. Высокая корреляция между задержками и простоями

может вызывать значительный рост задержек. Отказ и даже сам момент времени отказа приводит к существенному изменению последовательности выполнения операций (принятие управленческих решений), а также к возникновению задержек на разных технологических элементах. В результате этого невозможно поставить чистый эксперимент и найти разность задержек до и после отказа.

2 Определение влияния отказов на технологические потери

В связи с вышесказанным предлагается метод на основе оценки вероятности изменения суммарной задержек поездов при отказе продолжительностью τ . Суммарные задержки являются суммой всех задержек элементов, которые случайны. Предположим, что суммарные задержки на станции распределены нормально. Тогда

$$P(\tau) = \int_0^{\infty} (f_{\text{отк}}(\tau, t_3) * f_{\text{н}}(-t_3)) dt_3 - 0,5 = \int_{m_{\text{н}}=0}^{m_{\text{отк}}} (f_{\text{отк}}(\tau, t_3) * f_{\text{н}}(-t_3)) dt_3,$$

где «*» – символ композиции; $P(\tau)$ – вероятность потерь при возникновении отказа длительностью τ ; $f_{\text{отк}}(\tau, t_3)$ – плотность распределения задержек с отказом времени τ ; $f_{\text{н}}(-t_3)$ – плотность распределения задержек без отказов; $m_{\text{н}}$ и $m_{\text{отк}}$ – математические ожидания потерь в случае нормальной работы и с отказом соответственно (рис. 4).

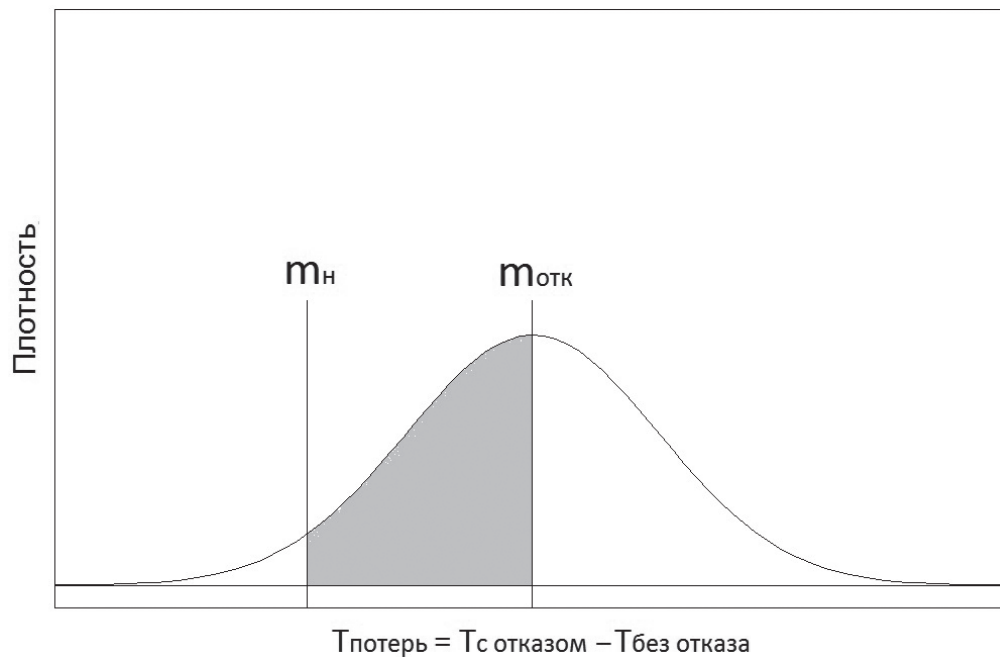


Рис. 4. Распределение потерь при возникновении отказа

Стоит учесть, что, в случае нормального распределения задержек в среднем, увеличение задержек в следующий период времени будет выше с вероятностью 50% или ниже, также с вероятностью 50%. Если потери при нормальной работе станции в среднем за большой период времени не увеличиваются, то принимаем $m_n = 0$.

Средний риск потерь от отказа элемента можно определить по выражению

$$R = C(\tau)P(\tau),$$

где $C(\tau)$ – функция экономических потерь от суммарных задержек, которая позволит учесть возможную нелинейную зависимость потерь от продолжительности отказа.

3 Моделирование работы станции

Приведем пример расчета вероятности суммарной задержки поездов для отказа продолжительностью 2 ч.

Сделаны две выборки по 50 экспериментов: первая – с отказом, вторая – без отказа. Эксперименты проводились независимо друг от друга с одинаковым перерабатываемым потоком на железнодорожной станции Курская. Для наиболее широкого охвата всех возможных случаев во всех экспериментах использовалось случайное расписание приема. Гистограммы и сглаженные плотности распределений получившихся суммарных задержек представлены на рис. 5. Отказ имитировался на самой загруженной стрелочной секции.

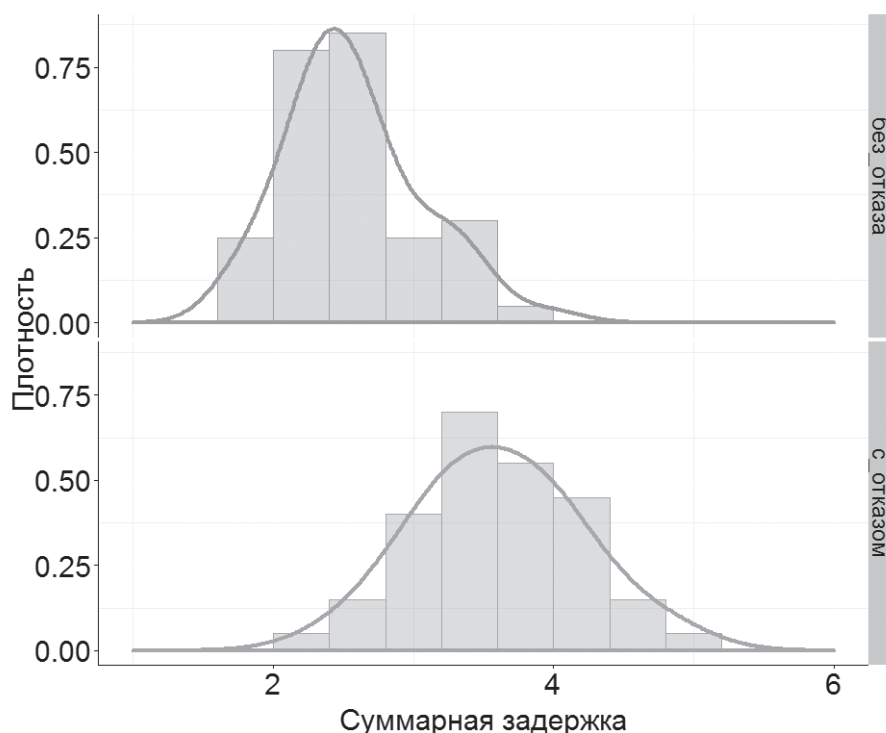


Рис. 5. Распределения суммарных задержек при нормальной работе и с отказом

На основании тестов Шапиро – Уилка можно считать обе генеральные совокупности нормальными.

Поочередно вычитая значения задержек без отказа от значений задержек с отказом, получаем выборку из $50 \cdot 50 = 2500$ значений. Выборка позволит построить гистограмму и сглаженную плотность распределения абсолютных издержек $T_{\text{потерь}} = T_{\text{с отказом}} - T_{\text{без отказа}}$.

Считая рассмотренные выше распределения нормальными, при их разнице должны получить также нормальное распределение [15].

Полученная величина имеет распределение, близкое к нормальному (рис. 6). Распределение потерь при отказе элемента позволяет сделать вывод: чем выше его математическое ожидание, тем сильнее сказывается отказ этого элемента на работе станции.

Заключение

По результатам численных экспериментов видно, что нельзя говорить об однозначном увеличении технологических потерь при возникновении отказа устройств железнодорожной автоматики и телемеханики из-за значительного влияния колебаний потока поездов и решений оперативного управленческого персонала. В то же время предложенная методика позволяет определить и вероятность увеличения потерь, и риск экономических потерь, связанный

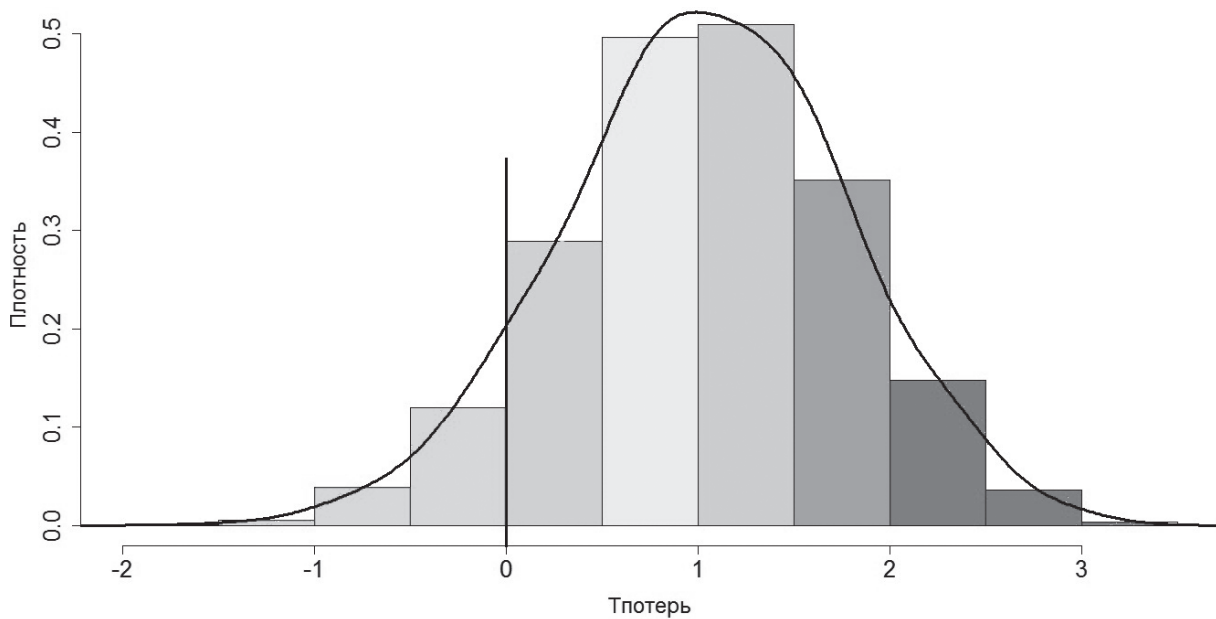


Рис. 6. Распределение потерь при отказе

с отказом. Сложность заключается в большом количестве требующихся для этого имитационных экспериментов, однако существует возможность автоматизации данного процесса.

Предложенный метод для получения численных оценок требует результатов имитационного моделирования, что позволяет получить непроизводительные задержки на элементах инфраструктуры. По сути, требуемые параметры можно получить от компьютерных систем автоматизации на основе анализа протоколов и архивов.

В перспективе можно рассмотреть задержки по операциям отдельно. Присвоив ранг каждому типу операций, применив рассмотренную методику и суммировав все полученные значения, можно адекватно оценить ущерб от отказа для перевозочного процесса. Однако предложенная методика может несколько измениться, поскольку нет никаких оснований считать каждую задержку по операции нормально распределенной.

На основе результатов моделирования можно утверждать, что увеличение размеров движения поездов ведет к большей чувствительности всей системы, к отказам и дополнительным внезапным остановкам поездов из-за нарушений работы устройств автоматики.

Библиографический список

1. Гапанович В. А. Внедрение методологии УРРАН в хозяйстве автоматики и телемеханики / В. А. Гапанович, Б. Ф. Безродный, А. В. Горелик, Д. В. Шалягин // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 4. – С. 12–16.

2. Горелик А. В. Модели оценки технологической эффективности систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, П. А. Неваров, И. А. Журавлев, А. С. Веселова // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 143–155.
3. Журавлев И. А. Принципы имитационного моделирования среднего времени до восстановления устройств железнодорожной автоматики / И. А. Журавлев // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 3. – С. 86–89.
4. Горелик А. В. Методы анализа безопасности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, И. А. Журавлев, Н. А. Тарадин // Надежность. – 2011. – № 1. – С. 40–46.
5. Горелик А. В. Методы анализа надежности и эффективности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, П. А. Неваров, И. А. Журавлев, Н. А. Тарадин // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 3. – С. 88–93.
6. Горелик А. В. Анализ показателей надежности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом экономических критериев / А. В. Горелик, А. В. Неваров // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 3. – С. 271–281.
7. Козлов П. А. Модель рационального распределения ограниченных ресурсов на обслуживание и модернизацию систем железнодорожной автоматики / П. А. Козлов, С. В. Бушуев // Транспорт Урала. – 2015. – № 1. – С. 48–52.
8. Тимухина Е. Н. Применение метода моделирования при решении задач, направленных на совершенствование транспортной инфраструктуры / Е. Н. Тимухина, Е. Е. Смородинцева, А. А. Кошечев // Транспорт : наука, техника, управление. – 2015. – № 1. – С. 53–56.
9. Тимухина Е. Н. Методология исследования работоспособности станций при технологических сбоях / Е. Н. Тимухина // Транспорт Урала. – 2011. – № 4. – С. 58–62.
10. Козлов П. А. Оценка инфраструктурных транспортных проектов методом моделирования / П. А. Козлов, А. Э. Александров // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 4. – С. 43–44.
11. Тимухина Е. Н. Повышение функциональной надежности железнодорожных станций при технологических сбоях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Екатеринбург : УрГУПС, 2012. – 384 с.
12. Никитин А. Б. Модель принятия решений в интеллектуальной системе управления движением поездов на станции / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев, Р. В. Кучумов // Транспорт Урала. – 2009. – № 2. – С. 22–25.
13. Никитин А. Б. Обобщение тенденций развития устройств электрической централизации и опыта тиражирования компьютерных систем оперативного управления движением поездов на станциях / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев // Транспорт Урала. – 2006. – № 2. – С. 2–8.
14. Никитин А. Б. Повышение эффективности систем электрической централизации / А. Б. Никитин // Автоматика связь, информатика. – 2010. – № 4. – С. 4–7.
15. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М. : Наука, 1969. – 275 с.

*Sergey V. Bushuev,
Anton N. Popov,
Stepan V. Styukov*

«Automation, remote control and communication
on railways transport» department
Ural state transport university

Approaches for damage determination for subway transportation processes in case of railway automation devices failures

Determination of the impact of failures of automation devices to the losses during the transportation processes for the current economic conditions is one of the most urgent tasks, the solution for which will allow to improve the service technology and to develop absolutely new approaches to the station and spans furnishing with automation devices. The methodology of resource and risks management and the methodology of reliability analysis as well as approach within which the simulation is applied allow to solve this problem for the purpose of the mainline railway transport.

The article demonstrates the approaches for assessing the damage to the transportation process under failures of railway automation devices. Thanks to simulation the samples of station performance were obtained, including the average of carriage inactivity and the total delay. The random component in the timetable of reception and departure of trains, as well as in the duration of technological operations results in random nature of station performance. The article provides that it is impossible to talk about definitive increase of technological losses in case of failure of railways automation and remote control devices because of the significant impact of train flow fluctuations and decisions, made by operational management personnel. The article also proposes a method, that allows to estimate the probability of increasing the losses as well as the risk of economic losses due to the failure.

simulation modelling; carriage inactivity; total delay; technological losses; automation devices

References

1. Gapanovich V.A., Bezrodny B.F., Gorelik A.V., Shalyagin D.V. (2012). Implementation of URRAN methodology into automation and remote control facilities [Vnedreniye metodologii URRAN v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki], Automation, communication, information science (Avtomatika, svyaz', informatika), issue 4, pp. 12–16.
2. Gorelik A.V., Nevarov P.A., Zhuravlev I.A., Veselova A.S. (2015). Models of assessment of technological efficiency of railway automation and remote control systems [Modeli otsenki tekhnologicheskoy effektivnosti sistem zheleznodorozhnoy

- avtomatiki i telemekhaniki], *Transport automation (Avtomatika na transporte)*, vol. 1, issue 2, pp. 143–155.
3. Zhuravlev I. A. (2012). Principles of simulation modelling of average time up to recovery of railway automation devices [Printsiipy imitatsionnogo modelirovaniya srednego vremeni do vosstanovleniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki], *Transport science and technology (Nauka i tekhnika transporta)*, issue 3, pp. 86–89.
 4. Gorelik A. V., Zhuravlev I. A., Taradin N. A. (2011). Methods of operation safety analysis of railway automation and remote control systems [Metody analiza bezopasnosti funktsionirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki], *Reliability (Nadezhnost')*, issue 1, pp. 40–46.
 5. Gorelik A. V., Nevarov P. A., Zhuravlev I. A., Taradin N. A. (2011). Methods of reliability and operational efficiency analysis of automation and remote control systems [Metody analiza nadezhnosti i effektivnosti funktsionirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki], *Transport science and technology (Nauka i tekhnika transporta)*, issue 3, pp. 88–93.
 6. Gorelik A. V., Nevarov P. A. (2015). Analysis of operational reliability indicators railway automation and remote control systems considering economic criteria [Analiz pokazateley nadezhnosti funktsionirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki s uchetom ekonomicheskikh kriteriyev], *Transport automation (Avtomatika na transporte)*, vol. 1, issue 3, pp. 271–281.
 7. Kozlov P. A., Bushuev S. V. (2015). Model of rational distribution of limited resources for maintenance and modernization of railway automation systems [Model' ratsional'nogo raspredeleniya ogranichennykh resursov na obsluzhivaniye i modernizatsiyu sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki], *Ural Transport (Transport Urala)*, issue 1, pp. 48–52.
 8. Timukhina E. N., Smorodintseva E. E., Koshcheev A. A. (2015). Implementation of simulation method for solving problems for the purpose of improving the transport infrastructure [Primeneniye metoda modelirovaniya pri reshenii zadach, napravlennykh na sovershenstvovaniye transportnoy infrastruktury], *Transport: science, technology, management (Transport: nauka, tekhnika, upravleniye)*, issue 1, pp. 53–56.
 9. Timukhina E. N. (2011). Methodology for operation integrity survey under technological breakdowns [Metodologiya issledovaniya rabotosposobnosti stantsiy pri tekhnologicheskikh sboiyakh], *Ural Transport (Transport Urala)*, issue 4, pp. 58–62.
 10. Kozlov P. A., Aleksandrov A. E. (2006). Evaluation of infrastructure projects using simulation method [Otsenka infrastrukturykh transportnykh proyektov metodom modelirovaniya], *Transport of the Russian Federation (Transport Rossiyskoy Federatsii)*, issue 4, pp. 43–44.
 11. Timukhina E. N. (2012). Increasing the operational reliability of railway station under technological breakdowns [Povysheniye funktsional'noy nadezhnosti zheleznodorozhnykh stantsiy pri tekhnologicheskikh sboiyakh], abstract of D. Sc. thesis in Engineering Science (Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk), Ekaterinburg, UrGUPS, 384 p.
 12. Nikitin A. B., Bushuev S. V., Kuchumov R. V. (2009). Decision-making model in intelligent system of train traffic control at station [Model' prinyatiya reshe-

- niy v intellektual'noy sisteme upravleniya dvizheniyem poyezdov na stantsii], Ural Trasport (Transport Urala), issue 2, pp. 22–25.
13. Nikitin A. B., Bushuev S. V. (2006). Summary of trends of developing the electrical interlocking devices and the experience of copying of train traffic operational control devices at stations [Obobshcheniye tendentsiy razvitiya ustroystv elektricheskoy tsentralizatsii i opyta tirazhirovaniya komp'yuternykh sistem operativnogo upravleniya dvizheniyem poyezdov na stantsiyakh], Ural Trasport (Transport Urala), issue 2, pp. 2–8.
 14. Nikitin A. B. (2010). Improving of electrical interlocking systems efficiency [Povysheniye effektivnosti sistem elektricheskoy tsentralizatsii], Automation, communication, information science (Avtomatika, svyaz', informatika), issue 4, pp.4–7.
 15. Venttsel' E. S. (1969). Theory of probability [Teoriya veroyatnostey], Moscow, Publishing house «Science» (Izdatel'stvo «Nauka»), 275 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным
Поступила в редакцию 25.02.2016, принята к публикации 22.05.2016*

БУШУЕВ Сергей Валентинович – проректор по научной работе и международным связям, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения.
e-mail: SBushuev@usurt.ru

ПОПОВ Антон Николаевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения.
e-mail: ANPopov@usurt.ru

СТЮКОВ Степан Валерьевич – аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения.
e-mail: ssvd91992@gmail.com

© Бушуев С. В., Попов А. Н., Стюков С. В., 2016