

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 621.3.019.3+656.25
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-10>

Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 2 (105). С. 84–94

Управление надёжностью и безопасностью перевозочного процесса с применением систем непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры



Дмитрий ЕФАНОВ



Евгений МИХАЙЛЮТА

Дмитрий Викторович Ефанов¹,
Евгений Михайлович Михайлюта²

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), Санкт-Петербург, Россия.

✉ ¹ TrES-4b@yandex.ru.

✉ ² evgeniymixa@gmail.com.

¹ РИНЦ Author ID 320051, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4563-6411>, WoS Researcher ID A-1086-2017, Scopus ID 36349091500

АННОТАЦИЯ

Анализируется проблема повышения надёжности и безопасности перевозочного процесса на железных дорогах. Показано, что современные системы управления движением поездов автоматически не учитывают события снижения надёжности объектов железнодорожной инфраструктуры, однако такая увязка вполне возможна. Приводится архитектура перспективной системы управления движением поездов, в которой основами выступают системы железнодорожной автоматики и телемеханики, имеющие безопасное информационное сопряжение со средствами непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры.

Целью статьи является изложение теоретических принципов управления надёжностью и безопасностью перевозочного процесса с применением систем автоматизации «нового поколения» – тесно интегрированных с техническими средствами мониторинга. Представлена упрощённая структура системы

управления движением поездов, имеющей информационное сопряжение со средствами непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры. Разработаны модели надёжности системы управления движением поездов, учитывающей состояния объектов железнодорожной инфраструктуры.

Показано, что в системе управления движением поездов необходимо учитывать наличие безопасного состояния инфраструктурного комплекса. Представлены возможности управления рисками снижения надёжности и безопасности перевозочного процесса за счёт использования средств стационарного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры.

Совершенствование технологий мониторинга и эффективное использование систем стационарного мониторинга на практике позволяют реализовать функцию управления надёжностью и безопасностью перевозочного процесса и железнодорожного комплекса в целом.

Ключевые слова: железные дороги, управление перевозочным процессом, безопасность движения поездов, системы железнодорожной автоматики и телемеханики, системы мониторинга инженерных конструкций и сооружений, модель надёжности системы управления движением поездов, управление надёжностью и безопасностью перевозочного процесса.

Для цитирования: Ефанов Д. В., Михайлюта Е. М. Управление надёжностью и безопасностью перевозочного процесса с применением систем непрерывного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 2 (105). С. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-10>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Устройства и системы управления ответственными технологическими процессами реализуются в соответствии с заданными требованиями по надёжности и безопасности функционирования. Это в полной мере касается и железнодорожного комплекса. Однако в процессе эксплуатации такой сложной системы, как железнодорожная транспортная система, где в перевозочный процесс вовлечено огромное количество участников, включая технические объекты и исполнителей (поездные диспетчеры, дежурные по станциям, машинисты, эксплуатационный персонал обслуживающих подразделений и др.), не исключено возникновение сбоев и устойчивых отказов. Они могут приводить к нарушениям в графике движения поездов, а некоторые из них, и вовсе, могут нести в себе угрозу безопасности движения поездов.

Конечными звеньями в сложной цепи обеспечения перевозочного процесса с точки зрения безопасности движения поездов выступают технические средства железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) [1]. Они позволяют осуществлять удалённое управление объектами на станциях и перегонах, в том числе, передавать машинистам посредством светофорной сигнализации данные о режимах проследования по участкам пути. Технические средства ЖАТ реализуются в соответствии с определёнными концепциями безопасности, например, для микроэлектронных систем методы и принципы обеспечения безопасности установлены в [2].

Тем не менее, технические средства ЖАТ хотя и реализуются безопасными, но не учитывают – в процессе эксплуатации – меняющиеся состояния объектов железнодорожной инфраструктуры, непосредственно не оказывающих влияния на них [3]. Именно поэтому не исключены такие ситуации в процессе эксплуатации железнодорожной транспортной системы, при которых наличие опасного дефекта искусственного сооружения (например, нарушение габарита приближения строений [4; 5]) не вызывает включения запрещающего показания на ограждающем соответствующий участок светофоре. Более того, запрещающее показание в системе ЖАТ в таком случае невозможно дать даже вручную (за исключением средств заградительной сигнализации).

Объекты железнодорожной инфраструктуры в целях повышения отказоустойчивости проходят процедуры диагностики с заранее установленной периодичностью с применением как ручных средств, так и автоматизированных.

К ним относятся носимые (мобильные) средства диагностирования, а также стационарные средства мониторинга. Последними в настоящее время оборудовано не так много объектов. Выбор объекта для мониторинга обуславливается наличием неприемлемого риска для безопасности движения поездов. К примеру, в [6] описан случай, когда на железных дорогах России произошло обрушение моста перед движущимся поездом (мост через реку Кола в Мурманской области, 1436 км 1 пк Октябрьской железной дороги). Впоследствии на данном участке возвели новый мост и оборудовали его системой мониторинга инженерных конструкций и сооружений^{1, 2}.

С точки зрения безопасности важно технически обеспечить увязку систем управления движением поездов с системами мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры, которые разрабатываются и постепенно внедряются в эксплуатацию [7–14]. Особенности построения систем ЖАТ при наличии увязки со средствами мониторинга описаны в [3].

Целью данной работы является изложение теоретических принципов управления надёжностью и безопасностью перевозочного процесса с применением систем автоматизации «нового поколения» – тесно интегрированных с техническими средствами мониторинга.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Архитектура безопасной системы управления движением поездов

На рис. 1 изображена архитектура безопасной системы управления движением поездов, в которой выделен контур управления и контур мониторинга, концепция которой описана в [3]. Причём в контуре мониторинга есть разделение на подсистему мониторинга устройств ЖАТ и подсистему мониторинга

¹ РЖД: мост с первой инновационной системой непрерывного мониторинга и подключением к управлению заградительным сигналом // Мостовые сооружения. XXI век. – 2021. – № 4 (51). – С. 18–19.

² Тренд XXI века: у моста через Колу в Мурманской области появился цифровой двойник. [Электронный ресурс]: <https://gudok.ru/news/infrastructure/?ID=1624944&ysclid=idbk3kmtol843556271>. Доступ 25.01.2023.



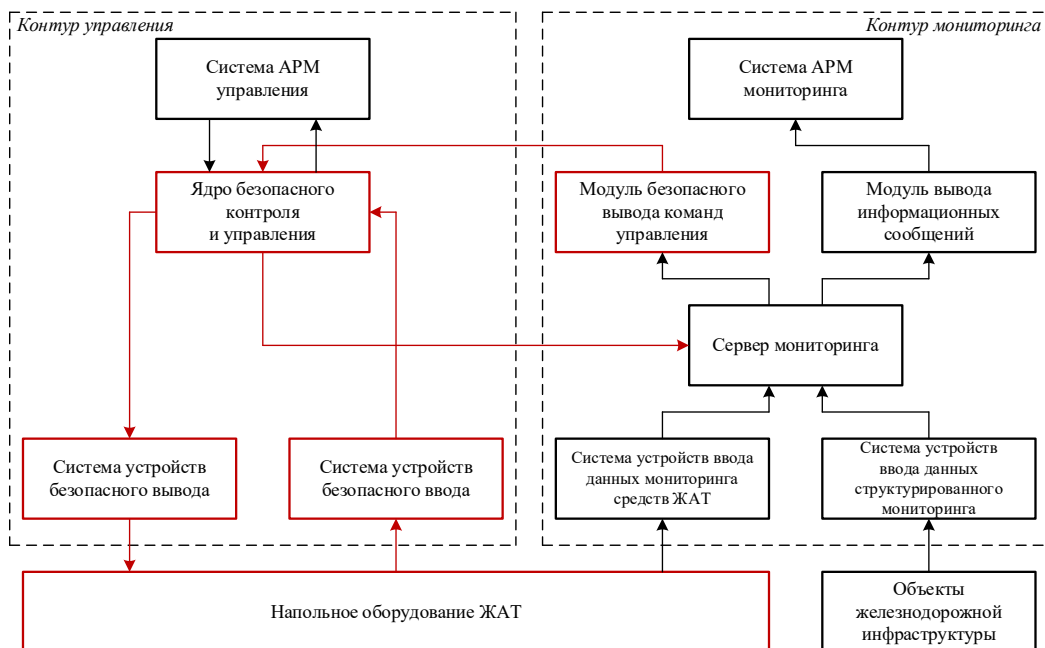


Рис. 1. Архитектура безопасной системы управления движением поездов [разработано авторами].

объектов железнодорожной инфраструктуры (красной (более светлой) рамкой выделены блоки, охватывающие устройства, на которые накладываются требования по функциональной безопасности).

В настоящее время системы мониторинга таким образом не реализуются: отдельно реализуются средства мониторинга устройств ЖАТ [7–9] и средства мониторинга объектов инфраструктуры по хозяйствам (и там, и там это преимущественно данные от носимых средств мониторинга, при этом могут использоваться и стационарные системы мониторинга) [10–14]. Однако ясно, что достоверная постановка диагноза и, как следствие, генеза и прогноза, невозможна без учёта исторических эксплуатационных данных об объектах мониторинга (физических характеристик, проводимых процедурах по обслуживанию и ремонтам, условий эксплуатации и т.д.), а также полного множества данных мониторинга о техническом состоянии всех объектов инфраструктуры, а не только отдельно взятых (например, только от систем мониторинга устройств ЖАТ). Более того, в настоящее время системы мониторинга никак не связаны с самими системами ЖАТ: ни напрямую целью обратной связи, ни в качестве средства индикации; не обозначают такой увязки и в ближайшем развитии систем управления движением поездов [15–18].

Необходимо отметить, что исторически системы ЖАТ не были наделены встраиваемыми средствами измерения и автоматического анализа диагностических данных [19].

Можно сказать, что на рис. 1 изображена архитектура перспективной системы ЖАТ, которая даёт возможность по данным мониторинга вычислить условия перехода в определённые защитные состояния как для самих средств ЖАТ, так и для объектов инфраструктурного комплекса. При этом, конечно, должна быть определена нормативная база для реализации такой системы, ведь на системы ЖАТ накладываются жёсткие ограничения на реализацию с позиции функциональной безопасности [20; 21]. Поэтому и на имеющиеся/известные системы стационарного мониторинга и средства интеллектуальной обработки результатов мониторинга должны накладываться подобного рода ограничения (при увязке систем), а принципы реализации безопасных систем мониторинга должны быть оговорены и регламентированы.

Граф состояний системы управления движением поездов

В [22] определено, что устройства и системы ЖАТ могут находиться в нескольких состояниях: исправном, работоспособном, работоспособном предотказ-

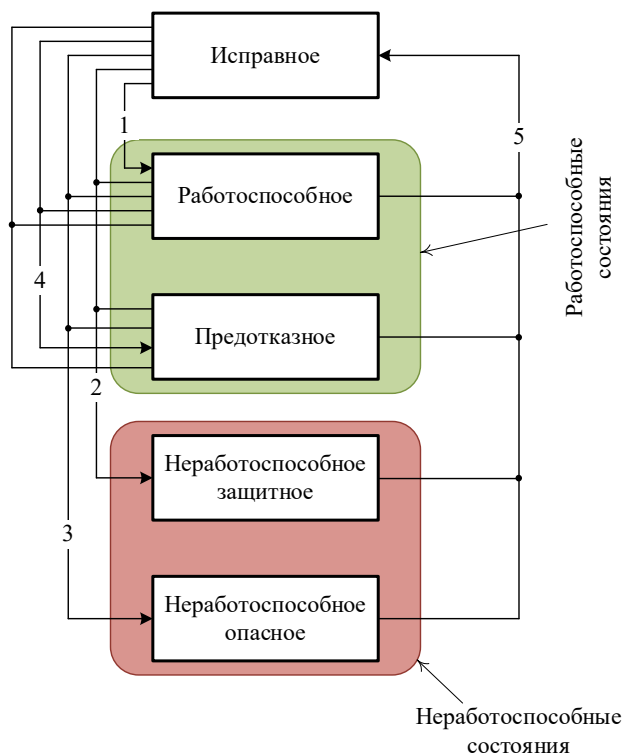


Рис. 2. Диаграмма состояний устройства или системы ЖАТ и переходов между ними [разработано авторами].

ном, неработоспособном защитном, неработоспособном опасном и предельном (строго говоря, предельное состояние – это крайняя степень неработоспособности объекта, оно может быть и защитным, и опасным). Подчеркнём, что это касается только устройств и систем ЖАТ как некоторых «замкнутых систем», которые не учитывают влияния дестабилизирующих факторов на инфраструктурный комплекс железных дорог [3].

На рис. 2 приведена диаграмма состояний устройств или систем ЖАТ и переходов между ними (предельное состояние не показано, так как оно фактически совпадает с одним из неработоспособных состояний). Переходы между состояниями происходят при ухудшении или улучшении рабочих характеристик и связаны с возникновением ряда событий. На рис. 2 цифрами 1, 2, 3 и 4 показаны переходы, происходящие при возникновении событий ухудшения состояния устройств или систем: 1 – повреждение, 2 – защитный отказ, 3 – опасный отказ, 4 – предотказ. Цифрой 5 показан переход, происходящий после проведения процедур восстановления и ремонта технического объекта. Неработоспособные состояния включают в себя как защитные, так и опасные

состояния. Работоспособные – как работоспособные, так и предотказные [22].

Переходы между состояниями устройства или системы происходят при воздействии потоков отказов и восстановлений. Граф переходов, таким образом, может быть изображен в виде, показанном на рис. 3.

На рис. 3 состояния обозначены следующим образом:

- S_0 – исправное состояние устройства или системы ЖАТ;
- S_1 – работоспособное состояние устройства или системы ЖАТ;
- S_2 – работоспособное предотказное состояние устройства или системы ЖАТ;
- S_3 – неработоспособное защитное состояние устройства или системы ЖАТ;
- S_4 – неработоспособное опасное состояние устройства или системы ЖАТ.

На дугах в графе рис. 3 указываются значения интенсивностей переходов системы управления движением поездов из состояния S_j в состояние S_i и наоборот. Интенсивности, связанные с ухудшением рабочих характеристик устройства или системы, обозначены через λ_{ij} , а с улучшением – через μ_{ji} .

Однако, подчеркнём, что состояния S_0 – S_4 относятся непосредственно к состояниям,



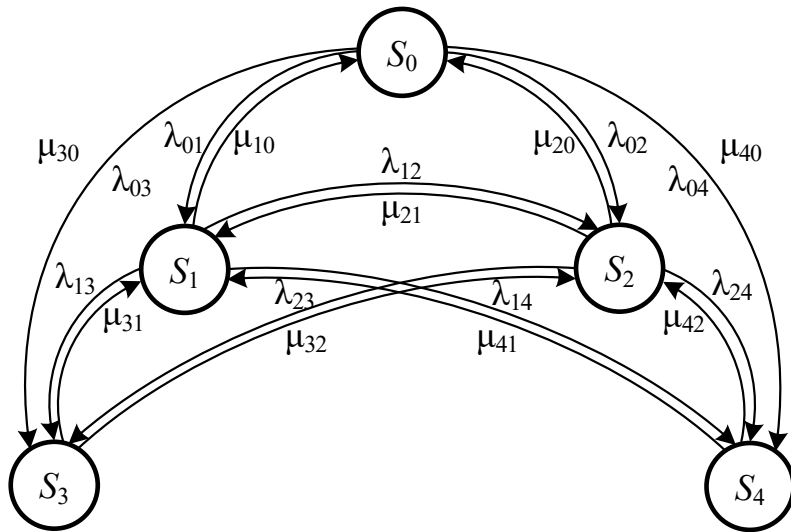


Рис. 3. Граф состояний устройства или системы ЖАТ [разработано авторами].

в которых находится устройство или система ЖАТ.

Рассмотрим далее систему управления движением поездов, которая включает в себя не только устройства и системы ЖАТ, но и средства инфраструктурного комплекса и системы их мониторинга. Расширим число состояний, в которые может переходить система управления движением поездов. Будем полагать далее, что состояния S_0 – S_4 относятся уже к рассматриваемой расширенной системе управления движением поездов. Положим, что системы стационарного мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры через безопасную платформу сопряжения связаны с системами ЖАТ. Таким образом, система мониторинга способна давать два дополнительных состояния для системы управления:

- S_5 – защитное состояние системы управления движением поездов, соответствующее дефекту объекта инфраструктуры;
- S_6 – опасное состояние системы управления движением поездов, соответствующее дефекту объекта инфраструктуры.

Модифицированный граф состояний системы управления движением поездов приведён на рис. 4. В нём введены два новых состояния и переходы, переводящие систему управления движением поездов в них. Состояния S_5 и S_6 относятся к двум состояниям нахождения системы управления движением в состоянии неработоспособности (или частичной работоспособности) объектов желез-

нодорожной инфраструктуры. В известных исследованиях, например, [23; 24], состояния S_5 и S_6 никак не фигурируют.

Граф, изображённый на рис. 4, не является полным (часть переходов исключена). Кроме того, отметим, что и для объектов мониторинга железнодорожной инфраструктуры могут быть введены в рассмотрение состояния, предшествующие отказу. Для искусственных сооружений – это так называемые предельные состояния (по нагрузке). В графе, представленном на рис. 4, предельные состояния, фиксируемые системой мониторинга, не выделены, хотя их введение в рассмотрение также возможно. На практике, переход в такое состояние может быть связан с введением особых режимов проследования участков пути с объектами железнодорожной инфраструктуры, для которых зафиксированы отклонения от допустимых норм [3].

Модели надёжности системы управления движением поездов

Положим, что процессы, протекающие в системе, являются Марковскими случайными процессами, и выполняются соответствующие условия. Это позволяет по графу рис. 4 получить систему уравнений А. Н. Колмогорова, принципы формирования которых описаны в [22] (1).

Система (1) дополняется нормировочным уравнением:

$$\sum_{i=1}^6 \frac{\partial P_i(t)}{\partial t} = 1. \tag{2}$$

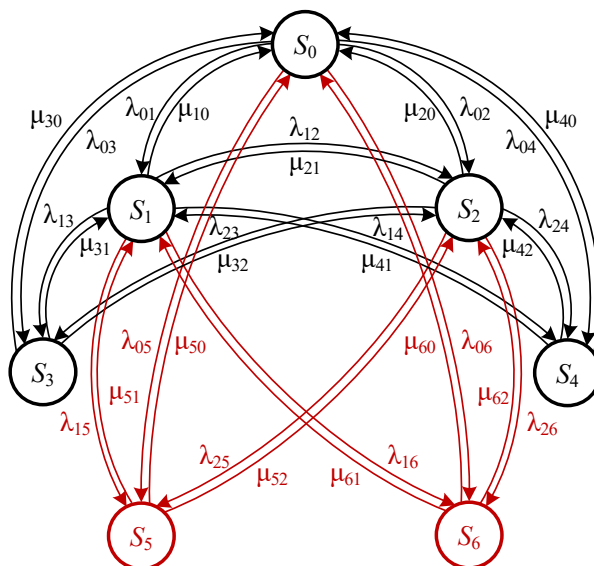


Рис. 4. Модифицированный граф состояний системы управления движением поездов [разработано авторами].

$$\begin{cases}
 \frac{\partial P_0(t)}{\partial t} = \mu_{10}P_1(t) + \mu_{20}P_2(t) + \mu_{30}P_3(t) + \mu_{40}P_4(t) + \mu_{50}P_5(t) + \mu_{60}P_6(t) - \\
 - (\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} + \lambda_{04} + \lambda_{05} + \lambda_{06})P_0(t); \\
 \frac{\partial P_1(t)}{\partial t} = \lambda_{01}P_0(t) + \mu_{31}P_3(t) + \mu_{41}P_4(t) + \mu_{21}P_2(t) + \mu_{51}P_5(t) + \mu_{61}P_6(t) - \\
 - (\mu_{10} + \lambda_{13} + \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} + \lambda_{16})P_1(t); \\
 \frac{\partial P_2(t)}{\partial t} = \lambda_{02}P_0(t) + \lambda_{12}P_1(t) + \mu_{42}P_4(t) + \mu_{32}P_3(t) + \mu_{52}P_5(t) + \mu_{62}P_6(t) - \\
 - (\mu_{20} + \mu_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25} + \lambda_{26})P_2(t); \\
 \frac{\partial P_3(t)}{\partial t} = \lambda_{03}P_0(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) - (\mu_{30} + \mu_{31} + \mu_{32})P_3(t); \\
 \frac{\partial P_4(t)}{\partial t} = \lambda_{04}P_0(t) + \lambda_{14}P_1(t) + \lambda_{24}P_2(t) - (\mu_{40} + \mu_{41} + \mu_{42})P_4(t); \\
 \frac{\partial P_5(t)}{\partial t} = \lambda_{05}P_0(t) + \lambda_{15}P_1(t) + \lambda_{25}P_2(t) - (\mu_{50} + \mu_{51} + \mu_{52})P_5(t); \\
 \frac{\partial P_6(t)}{\partial t} = \lambda_{06}P_0(t) + \lambda_{16}P_1(t) + \lambda_{26}P_2(t) - (\mu_{60} + \mu_{61} + \mu_{62})P_6(t).
 \end{cases} \quad (1)$$

При $t \rightarrow \infty$ имеет место следующая предельная теорема А. А. Маркова [22]: если все интенсивности потоков событий постоянны, а граф состояний таков, что из каждого состояния можно перейти в каждое другое за конечное число шагов, то предельные вероятности состояний существуют и не зависят от начального состояния системы.

Анализ графа, изображённого на рис. 2, позволяет сделать вывод о применимости к рассматриваемой системе теоремы Маркова. В соответствии с этой теоремой получаем:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\partial P_i(t)}{\partial t} = 0, i = \overline{0, 6}. \quad (3)$$

Используя (3) и (2), перепишем систему (1) в виде (4).

Система (4) решается любым из известных методов [22].

Отбросив одно из уравнений системы (4) (кроме нормировочного), перейдём к матричной форме (5).

Обозначим через A_i матрицы, в которых i -ый столбец заменяется столбцом свободных членов, $i = \overline{0, 6}$, а через Δ и Δ_i – определитель матрицы A и A_i . Тогда для получения значений может использоваться метод Крамера:

$$P_i(t) = \frac{\Delta_i}{\Delta}, i = \overline{0, 6}. \quad (6)$$



$$\begin{cases}
 \mu_{10}P_1(t) + \mu_{20}P_2(t) + \mu_{30}P_3(t) + \mu_{40}P_4(t) + \mu_{50}P_5(t) + \mu_{60}P_6(t) - \\
 -(\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{03} + \lambda_{04} + \lambda_{05} + \lambda_{06})P_0(t) = 0; \\
 \lambda_{01}P_0(t) + \mu_{31}P_3(t) + \mu_{41}P_4(t) + \mu_{21}P_2(t) + \mu_{51}P_5(t) + \mu_{61}P_6(t) - \\
 -(\mu_{10} + \lambda_{13} + \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} + \lambda_{16})P_1(t) = 0; \\
 \lambda_{02}P_0(t) + \lambda_{12}P_1(t) + \mu_{42}P_4(t) + \mu_{32}P_3(t) + \mu_{52}P_5(t) + \mu_{62}P_6(t) - \\
 -(\mu_{20} + \mu_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25} + \lambda_{26})P_2(t) = 0; \\
 \lambda_{03}P_0(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) - (\mu_{30} + \mu_{31} + \mu_{32})P_3(t) = 0; \\
 \lambda_{04}P_0(t) + \lambda_{14}P_1(t) + \lambda_{24}P_2(t) - (\mu_{40} + \mu_{41} + \mu_{42})P_4(t) = 0; \\
 \lambda_{05}P_0(t) + \lambda_{15}P_1(t) + \lambda_{25}P_2(t) - (\mu_{50} + \mu_{51} + \mu_{52})P_5(t) = 0; \\
 \lambda_{06}P_0(t) + \lambda_{16}P_1(t) + \lambda_{26}P_2(t) - (\mu_{60} + \mu_{61} + \mu_{62})P_6(t) = 0; \\
 P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) = 1.
 \end{cases} \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix}
 \lambda_{01} & -\mu_{10} - \lambda_{13} - \lambda_{12} - \lambda_{14} - \lambda_{15} - \lambda_{16} & & & & & & & & & \\
 \lambda_{02} & & \lambda_{12} & & & & -\mu_{20} - \mu_{21} - \lambda_{23} - \lambda_{24} - \lambda_{25} - \lambda_{26} & & & & & & \\
 \lambda_{03} & & \lambda_{13} & & & & \lambda_{23} & & & & & & & \\
 \lambda_{04} & & \lambda_{14} & & & & \lambda_{24} & & -\mu_{30} - \mu_{31} - \mu_{32} & & & & & \\
 \lambda_{05} & & \lambda_{15} & & & & \lambda_{25} & & 0 & & -\mu_{40} - \mu_{41} - \mu_{42} & & & \\
 \lambda_{06} & & \lambda_{16} & & & & \lambda_{26} & & 0 & & 0 & & -\mu_{50} - \mu_{51} - \mu_{52} & \\
 1 & & 1 & & & & 1 & & 0 & & 0 & & -\mu_{60} - \mu_{61} - \mu_{62} & \\
 & & & & & & & & 1 & & 1 & & 1 & \\
 & & & & & & & & & & & & & 1 \\
 & & & & & & & & & & & & & 0 \\
 & & & & & & & & & & & & & 0 \\
 & & & & & & & & & & & & & 0 \\
 & & & & & & & & & & & & & 0 \\
 & & & & & & & & & & & & & 0 \\
 & & & & & & & & & & & & & 1
 \end{pmatrix} \quad (5)$$

На практике значения величин интенсивностей переходов между состояниями системы управления движением поездов получить достаточно трудоёмко, в особенности касаясь переходов в опасные состояния. Поэтому требуется проведение имитационного моделирования. Статистические данные можно получить как раз с использованием средств мониторинга при эксплуатации на достаточно большом временном промежутке.

Для графа, приведённого на рис. 4, могут быть заданы вероятности переходов из состояния S_i в состояния S_j , и наоборот. Тогда модель надёжности может быть задана с помощью матрицы переходных вероятностей и вектора начальных вероятностей. Для графа, изображённого на рис. 4, она имеет вид:

$$P_{ij}(t) = \begin{pmatrix}
 p_{00} & p_{01} & p_{02} & p_{03} & p_{04} & p_{05} & p_{06} \\
 p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\
 p_{20} & p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\
 p_{30} & p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\
 p_{40} & p_{41} & p_{42} & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\
 p_{50} & p_{51} & p_{52} & 0 & 0 & p_{55} & 0 \\
 p_{60} & p_{61} & p_{62} & 0 & 0 & 0 & p_{66}
 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Вектор начальных вероятностей имеет вид:

$$P_i(0) = (P_0(0), P_1(0), P_2(0), P_3(0), P_4(0), P_5(0), P_6(0)). \quad (8)$$

Например, в [24] автор использует численные данные, полученные по результатам эксплуатации железнодорожного пути на одном из участков Казахстана, для решения похожей задачи для оценки состояния верхнего строения пути (без учёта данных от

систем стационарного мониторинга, а только по данным систем учёта отказов).

На практике использование приведённых моделей надёжности требует наличия статистических данных об эксплуатации объектов инфраструктуры на рассматриваемом участке железной дороги – это может быть как оценка в пределах станции и примыкающих перегонов, так и оценка в пределах некоторого участка железнодорожной линии. Естественно, данные будут сильно отличаться для станций и перегонов с различной технической оснащённостью, выработанным ресурсом и загруженностью.

Пример определения вероятностей нахождения системы в различных состояниях

В эксперименте отсутствовала привязка к конкретному участку железной дороги, а матрица переходов и вектор начального состояния были заданы произвольно:

$$P_{ij}(t) = \begin{pmatrix}
 0,3 & 0,3 & 0,2 & 0,1 & 0,01 & 0,08 & 0,01 \\
 0,2 & 0,48 & 0,05 & 0,1 & 0,01 & 0,15 & 0,01 \\
 0,2 & 0,38 & 0,05 & 0,2 & 0,01 & 0,15 & 0,01 \\
 0,2 & 0,69 & 0,01 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\
 0,2 & 0,74 & 0,01 & 0 & 0,05 & 0 & 0 \\
 0,2 & 0,69 & 0,01 & 0 & 0 & 0,1 & 0 \\
 0,2 & 0,74 & 0,01 & 0 & 0 & 0 & 0,05
 \end{pmatrix},$$

$$P_i(0) = (1,0,0,0,0,0,0).$$

С использованием калькулятора Марковских цепей [25] была проведена симуляция работы системы, описываемой графом рис. 4, при выбранных исходных данных. Вектор

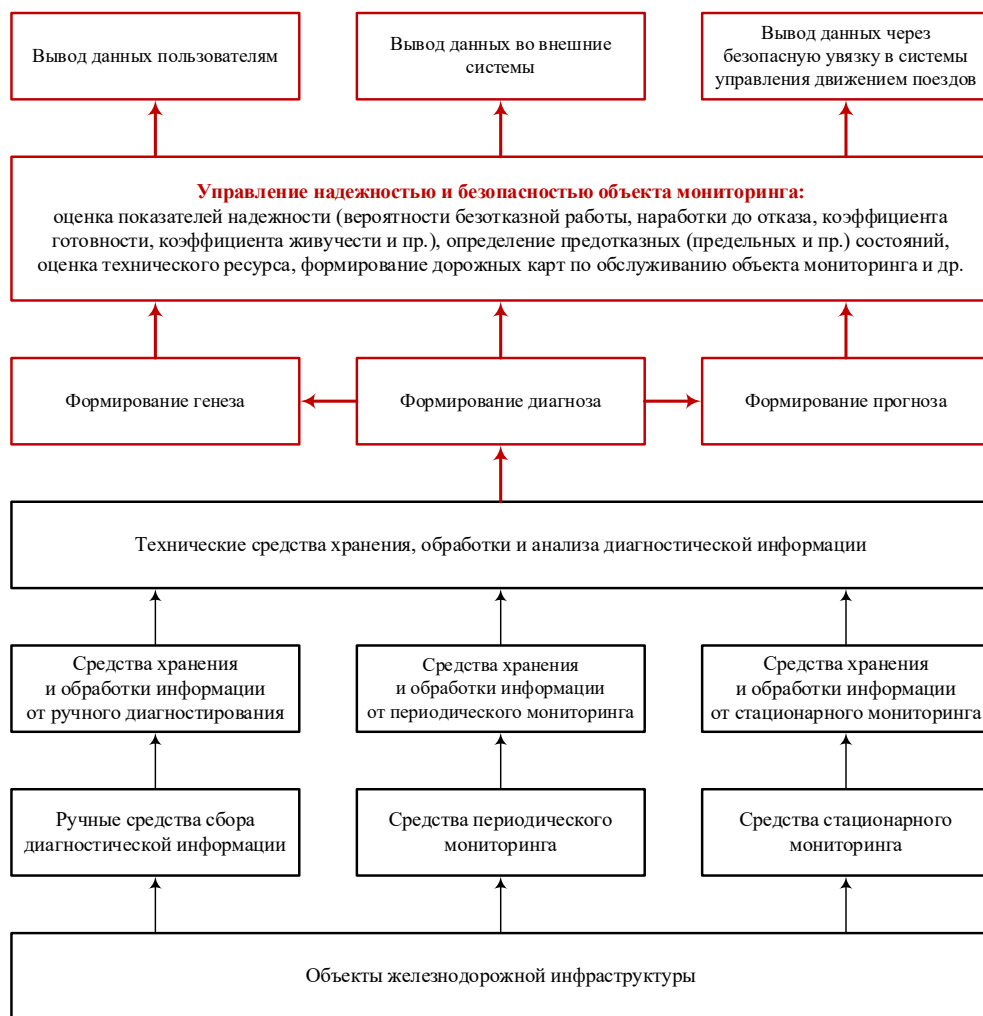


Рис. 5. Структура управления надёжностью и безопасностью с применением систем мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры [разработано авторами].

устойчивого состояния, полученный на третьем шаге симуляции, имеет следующий вид:
 $P_i(0) = (0, 22, 0, 48, 0, 07, 0, 1, 0, 01, 0, 11, 0, 01)$.

Для реальных примеров будут получены иные значения, так как на практике вероятности переходов в опасные состояния крайне малы. Например, для элементов устройств и систем управления движением поездов интенсивности опасных отказов, по данным [2], лежат в диапазоне

$$\lambda = 10^{-8} \dots 10^{-14} \frac{1}{4}.$$

Данные для моделирования могут уточняться с использованием действующих стационарных и носимых средств мониторинга и технического диагностирования, а сам процесс эксплуатации будет описываться постоянно меняющимися данными о техническом состоянии объектов инфраструктуры.

Управление надёжностью и безопасностью перевозочного процесса с использованием данных средств стационарного мониторинга

Техническая увязка систем управления движением поездов с системами мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры позволяет на практике решать задачу управления надёжностью и снижать риски нарушения безопасности движения поездов.

Управление рисками снижения надёжности возможно за счёт влияния на величины интенсивностей отказов, причем как возникающих в самой системе в процессе её эксплуатации, так и от отказов, которые могут развиваться при некачественном техническом обслуживании и ремонте (вспомните уже упомянутый ранее пример, когда неверно проведённое обслуживание опор моста через



реку Кола привело к обрушению моста [6]).

Обозначим через λ_F и λ_M интенсивности отказов при эксплуатации системы и при её обслуживании соответственно, а величину потерь от отказа объекта инфраструктуры – через P . Тогда риск может быть определён по формуле:

$$R = P\lambda_{FM}, \quad (9)$$

где $\lambda_{FM} = \lambda_F + \lambda_M$.

В формуле (9) возможно уменьшение величины λ_{FM} за счёт использования средств мониторинга:

$$R(\tilde{\lambda}_{FM}) \rightarrow \min_{\tilde{\lambda}_{FM} \in \Omega_{\tilde{\lambda}_{FM}}}. \quad (10)$$

Уменьшение величины λ_{FM} достигается как уменьшением λ_F , так и уменьшением λ_M . Уменьшение величины λ_F возможно за счёт фиксации множества состояний, предшествующих отказу (предотказных, предельных и прочих состояний, синонимично употребляемых в различных областях техники). Уменьшение величины λ_M возможно за счёт формирования дорожных карт по обслуживанию объектов мониторинга (прогнозных времён обслуживания устройства) и повышения сроков их эксплуатации. Это, естественно, возможно только при совершенствовании технологий мониторинга технического состояния, стандартизации и введении норм по оценке достоверности результатов мониторинга.

Снижение рисков (10) способствует и снижению опасных отказов в работе объектов инфраструктуры железнодорожного комплекса и системы управления движением поездов (при их увязке) в целом.

Снижение риска нарушения безопасности движения поездов возможно за счёт введения дополнительных защитных состояний системы управления движением поездов (рис. 4). События, переводящие систему в состояния S_4 и S_6 , должны быть исключены конструктивно. Для систем ЖАТ это так и реализуется в настоящее время на этапе разработки (но, к слову, возникновение переходов в опасные состояния возможно при неправильной пусконаладке и последующем содержании устройств и систем ЖАТ, чему есть достаточное количество примеров из практики эксплуатации). Для объектов инфраструктурного комплекса опасное воздействие исключается путём обслуживания и периодического мониторинга носимыми средствами диагностики. При наличии стационарной системы

мониторинга в системе управления движением поездов само по себе будут учитываться и дефекты железнодорожной инфраструктуры. А значит, такие события, которые потенциально могут привести к аварии или катастрофе, будут предупреждены и предотвращены путём воздействия на сам перевозочный процесс.

Наличие стационарной системы мониторинга позволяет снизить риск от возникновения опасных отказов железнодорожной инфраструктуры, которые происходят с интенсивностью λ_F^D :

$$R_D = P_D\lambda_F^D, \quad (11)$$

где P_D – величина потерь от опасного отказа.

Таким образом, наличие стационарной системы мониторинга, увязанной с системой управления движением поездов, позволяет снизить величину λ_F^D и минимизировать риск нарушения безопасности движения поездов:

$$R(\tilde{\lambda}_F^D) \rightarrow \min_{\tilde{\lambda}_F^D \in \Omega_{\tilde{\lambda}_F^D}}. \quad (12)$$

Увязка системы мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры с системой управления движением поездов позволяет повысить надёжность и безопасность перевозочного процесса (рис. 5). Красной (более светлой) рамкой на рис. 5 выделены блоки, соответствующие информационным процессам в системе мониторинга.

При совершенствовании подходов к синтезу систем управления движением поездов с информационным сопряжением с системами мониторинга создаётся возможность управления надёжностью и безопасностью железнодорожного комплекса в целом. Кроме того, возможна и последующая информационная увязка с системами организации и оперативного управления движением поездов, а отказы средств железнодорожной инфраструктуры могут автоматически учитываться при управлении движением на железнодорожных линиях в условиях действия внешних дестабилизирующих факторов. Это, в свою очередь, способствует развитию принципов диспетчеризации перевозочного процесса. Например, за счёт увязки системы мониторинга с системой управления движением поездов может быть модифицирована инновационная система интеллектуальной диспетчеризации, описанная в [26]. В ней уже предлагается помимо известных функций системы диспетчеризации использовать информацию о прогнозируемых моментах

времени начала и окончания технологических операций на станциях для автоматического построения на этой основе фрагментов графика движения поездов, а после их одобрения поездным диспетчером, – осуществлять передачу по радиоканалу машинисту рекомендуемых режимов ведения поезда. Однако описание концептуальных основ такой увязки находится за пределами настоящей статьи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Управление надёжностью и безопасностью перевозочного процесса на железных дорогах возможно за счёт совершенствования технологий мониторинга и эффективного использования систем стационарного мониторинга. Это позволяет не только оптимизировать процедуры по эксплуатации и техническому содержанию объектов железнодорожной инфраструктуры, но и открыть возможности по созданию системы управления движением поездов, автоматически учитывающей в процессе реализации перевозочного процесса состояние железнодорожной инфраструктуры.

Техническая увязка систем управления движением поездов и стационарных систем мониторинга с выработкой управляющих воздействий для средств регулирования движения может существенно повысить уровень безопасности железнодорожной транспортной системы. Но при этом на саму систему мониторинга накладываются определённые ограничения, связанные с достоверностью выработки того или иного информационного сообщения по результатам анализа данных мониторинга. Как отмечалось ранее [3], на практике данная величина должна нормироваться, а сами системы мониторинга сертифицироваться на соответствие уровням полноты безопасности. Введение на этапе синтеза системы ЖАТ дополнительных состояний, связанных с переходом в защитные и опасные состояния объектов критической железнодорожной инфраструктуры (непосредственно оказывающих влияние на безопасность перевозочного процесса), позволяет предусмотреть в системе управления возможные реакции на снижение показателей безопасности и выработку защитного воздействия.

Представленные в статье модели надёжности безопасных систем управления движением поездов позволяют оценить на каждом этапе эксплуатации вероятность перехода в то

или иное состояние. В особенности эффективным могло бы быть их использование в составе цифровых моделей железнодорожных станций, перегонов и целых линий при должном оснащении техническими средствами мониторинга.

Важными, как с теоретической, так с практической точек зрения, являются дальнейшие исследования, связанные с анализом представленных в статье моделей с учетом реальных статистических данных для отдельных участков железных дорог, формированием требований к безопасной реализации «функции мониторинга» и самих систем мониторинга, установлением критериев перехода системы управления движением поездов в различные состояния при возникновении дефектов объектов железнодорожной инфраструктуры, разработкой концепций интеграции такой системы управления в единую интеллектуальную систему диспетчеризации, а также с имитационным моделированием железнодорожных транспортных систем с оценкой влияния использования результатов мониторинга на перевозочный процесс для автоматического воздействия на участников движения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Theeg, G., Vlasenko, S. Railway Signalling & Interlocking. 3rd ed., Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020, 552 p. ISBN 978-3-96245-169-1.
2. Руководящий Технический Материал. 32 ЦШ 1115842.01-94 Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы и принципы обеспечения безопасности микроэлектронных СЖАТ // Разр. Вл. В. Сапожников, В. В. Сапожников, Д. В. Гавзов, В. И. Талалаев, О. А. Наседкин, М. В. Илюхин, Д. М. Котельников. – СПб., 1994. – 120 с. [Электронный ресурс]: http://static.scbist.com/scb/uploaded/27232_1504002436.pdf. Доступ 01.02.2023.
3. Ефанов Д. В., Хорошев В. В., Осадчий Г. В. Концептуальные основы синтеза безопасных систем управления движением поездов // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. – № 3 (100). – С. 50–57. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-6.
4. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Седых Д. В., Барч Д. В. Организация непрерывного мониторинга углов наклона опор железнодорожной контактной сети // Транспорт Урала. – 2017. – № 2. – С. 37–41. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-37-41.
5. Swiss Transportation Safety Investigation Board STSB, Annual Report 2018, 67 p. [Электронный ресурс]: https://www.sust.admin.ch/inhalte/pdf/Jahresberichte_u_Statistiken/SUST_JB_2018_EN.pdf. Доступ 01.02.2023.
6. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Аганов И. А. Барьерная функция систем мониторинга в увязке с системами управления движением поездов // Транспорт Российской Федерации. – 2021. – № 3. – С. 51–56. [Электронный ресурс]: <https://ntc-ksm.ru/barernaya-funkcziya-sistem-monitoringa-v-uvyazke-s-sistemami-upravleniya-dvizeniem-poezdov-15-06-2021/>. Доступ 01.02.2023.



7. Ефанов Д. В., Богданов Н. А. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты // Транспорт Урала. – 2013. – № 1. – С. 36–42. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18951854>. Доступ 25.01.2023.
8. Heidmann, L. Smarter Weichenantrieb: Wegbereiter für Predictive Maintenance [Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance]. Signal + Draht, 2018, Iss. 9, pp. 70–75. [Электронный ресурс]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=325894> [платный доступ].
9. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: Монография. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с. ISBN 978-5-7641-0933-6.
10. Efanov, D., Osadchych, G., Sedykh, D. Development of Rail Roads Health Monitoring Technology Regarding Stressing of Contact-Wire Catenary System. Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 19–20 May, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911431.
11. Efanov, D., Osadchych, G., Sedykh, D., Pristensky, D., Barch, D. Monitoring System of Vibration Impacts on the Structure of Overhead Catenary of High-Speed Railway Lines. Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016, pp. 201–208, DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807691.
12. Diaferio, M., Fraddosio, A., Piccioni, M. D., Castellano, A., Mangialardi, L., Soria, L. Some Issues in the Structural Health Monitoring of a Railway Viaduct by Ground Based Radar Interferometry. 2017 IEEE Workshop on Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 24–25 July 2017, Milan, Italy, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EESMS.2017.8052699.
13. Dhage, M. R., Vemuru, S. Structural Health Monitoring of Railway Tracks Using WSN. International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA), 17–18 August 2017, Pune, India, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICCUBEA.2017.8463976.
14. Wang, H., Núñez, A., Liu, Z., Chen, J., Dollevoet, R. Intelligent Condition Monitoring of Railway Catenary Systems: A Bayesian Network Approach. Chapter in: Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Vol 2. Proceedings of the 25th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD 2017), 14–18 August 2017, Rockhampton, Queensland, Australia. Ed. by M. Spiryagin, T. Gordon, C. Cole, T. McSweeney, pp. 1–6. [Электронный ресурс]: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781351057189-24/intelligent-condition-monitoring-railway-catenary-systems-bayesian-network-approach-hongrui-wang-alfredo-n%C3%BA%C3%B1ez-rolf-dollevoet-zhigang-liu-junwen-chen> [платный доступ].
15. Efanov D., Lykov A., Osadchych G. Testing of Relay-Contact Circuits of Railway Signalling and Interlocking. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017, pp. 242–248. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110095.
16. Wernet, M., Brunokowski, M., Witt, P., Meiwald, T. Digitale Werkzeuge zur Zustandsbestimmung und Diagnose von Relaisstellwerken [Digital Tools for Relay Interlocking Diagnostics and Condition Assessment]. Signal + Draht, 2019, Iss. 11, pp. 39–45. [Электронный ресурс]: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=1136152&lng=en> [платный доступ].
17. Huang Lujiang. The Past, Present and Future of Railway Interlocking System. IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), 11–13 September 2020. DOI: 10.1109/ICITE50838.2020.9231438.
18. Bădău, F. Railway Interlockings – A Review of the Current State of Railway Safety Technology in Europe. Promet-Traffic & Transportation, 2022, Vol. 34, Iss. 3, pp. 443–454. DOI: 10.7307/pt.v34i3.3992.
19. Сапожников Вл. В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов. – М.: Наука, 2021. – 229 с. ISBN 978-5-02-040877-7.
20. Лисенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов: Учебник для студентов вузов ж.д. трансп. – М.: ВИНТИ РАН, 1999. – 331 с. ISBN 5-900242-29-3.
21. Бестемьянов П. Ф. Методы обеспечения безопасности аппаратных средств микропроцессорных систем управления движением поездов // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 2–8. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44000551> [платный доступ].
22. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Основы теории надёжности и технической диагностики. – СПб: Издательство «Лань», 2019. – 588 с. ISBN 978-5-8114-3453-4.
23. Шамапов В. И. Обобщённая математическая модель процесса эксплуатации систем автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 163–179. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/obobschennaya-matematicheskaya-model-protsessak-ekspluatatsii-sistem-avtomatiki-i-telemehaniki/>. Доступ 01.02.2023.
24. Шамапов В. И. Математические модели надёжности систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 7–19. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-modeli-nadezhnosti-sistem-zheleznodorozhnoy-avtomatiki-i-telemehaniki/>. Доступ 01.02.2023.
25. Markov Chain Calculator. [Электронный ресурс]: <https://www.statskingdom.com/markov-chain-calculator.html>. Доступ 01.02.2023.
26. Кокурин И. М., Ефанов Д. В. Технологические основы инновационной системы автоматического управления движением поездов // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 5. – С. 19–23. DOI: 10.34649/AT.2019.5.5.003.

Информация об авторах:

Ефанов Дмитрий Викторович – доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), Санкт-Петербург, Россия, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе Научно-исследовательского и проектного института Транспортной и строительной безопасности, профессор Российского университета транспорта (МИИТ), профессор Ташкентского государственного транспортного университета, TrES-4b@yandex.ru.

Михайлюта Евгений Михайлович – аспирант Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), Санкт-Петербург, Россия, evgeniyutixa@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 19.04.2023, одобрена после рецензирования 12.05.2023, принята к публикации 29.05.2023.