

Применение теории массового обслуживания и сетей Петри при анализе параметров системы обслуживания тягового подвижного состава методом математического моделирования

И.И. Лакин¹✉, В.В. Семченко²

¹Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва, Российская Федерация

²АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск, Российская Федерация

✉lakin16@mail.ru

Резюме

Современный тяговый подвижной состав требует актуальной системы технического обслуживания и ремонта, создание которой должно привести к оптимизации ее параметров согласно диаграмме Тагути. Поэтому тема данного исследования – разработка имитационной математической модели эксплуатации и обслуживания с целью факторного анализа и выбора параметров системы обслуживания жизненного цикла составов – на сегодняшний день имеет большую важность. Процесс обслуживания в условиях депо предполагает использование ограниченного числа позиций для планового ремонта по пробегу и непланового ремонта подвижного состава, что соответствует тематике теории массового обслуживания. Для поставленной задачи наиболее точно подходит модель «сеть Петри», когда каждое последующее состояние модели определяется предыдущим дискретным состоянием и заданием на моделирование: размерами полигона, временем оборота, числом пар поездов в сутки, периодичностью ремонтов, а также стохастическими процессами возникновения отказов и случайным временем задержки поездов после отказов и в результате обслуживания. Согласно канонам теории массового обслуживания и сетей Петри разработана программа на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications в среде MS Excel. В статье описан алгоритм программы. В программе последовательно для заданного числа дней моделирования для каждого часа суток определяется необходимость постановки каждого из свободных составов на ремонт, в случае отсутствия свободных ремонтных позиций состав ставится в очередь. Не поставленные на ремонт составы подвываются к поездам, отправляемым в текущий час. В поездке моделируются отказы с заданной интенсивностью, которая считается постоянной.

Ключевые слова

математическое моделирование, теория массового обслуживания, сети Петри, обслуживание тягового подвижного состава

Для цитирования

Лакин И.И. Применение теории массового обслуживания и сетей Петри при анализе параметров системы обслуживания тягового подвижного состава методом математического моделирования / И.И. Лакин, В.В. Семченко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 4 (80). С. 65–77. DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).65-77.

Информация о статье

поступила в редакцию: 25.10.2023 г.; поступила после рецензирования: 13.12.2023 г.; принята к публикации: 14.12.2023 г.

Application of queuing theory and Petri nets in the analysis of traction rolling stock maintenance parameters by mathematical modeling

I.I. Lakin¹✉, V.V. Semchenko²

¹Railway Engineering Center, Moscow, the Russian Federation

²JSC «Road Center for the implementation of the Krasnoyarsk Railway», Krasnoyarsk, the Russian Federation

✉lakin16@mail.ru

Abstract

Modern traction rolling stock requires an up-to-date system of maintenance and repair, the creation of which requires optimization of its parameters according to the Taguchi diagram. Therefore the importance of the task makes the topic of the article relevant i.e. the development of a simulation mathematical model of operation and maintenance for the purpose of factor analysis and selection of parameters of the trains' life cycle maintenance system. The maintenance process under the depot conditions involves the use of a limited number of repair positions for both planned mileage repair and unplanned repairs of rolling stock, which corresponds to the topic of the queuing theory. The «Petri net» model is most suitable for this task, when each subsequent state of the model is determined by the previous discrete state and the task for modeling: the size of the polygon, the turnaround time, the number of train pairs per day, the repairs frequency, as well as stochastic processes of failure occurrence and random train delay time after failures and service delay. According to the canons of queuing theory and Petri nets, a program has been developed in the Visual Basic algorithmic language for Applications in the MS Excel environment. The article describes the algorithm of the program. In the program, sequentially for a given number of modeling days for each hour of the day, the need for

each of the free trains to be repaired is determined; in the absence of free repair positions the train is queued. Free trains are tied to trains departing at the current hour. During the trip, failures are simulated with a given intensity, which is considered constant. The article provides examples of simulation results in relation to promising high-speed electric trains.

Keywords

mathematical modeling, queuing theory, Petri nets, maintenance of traction rolling stock

For citation

Lakin I.I., Semchenko V.V. Primenenie teorii massovogo obsluzhivaniya i setei Petri pri analize parametrov sistemy obsluzhivaniya tyagovogo podvizhnogo sostava metodom matematicheskogo modelirovaniya [Application of queuing theory and Petri nets in the analysis of traction rolling stock maintenance parameters by mathematical modeling]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 4(80), pp. 65–77. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.4(80).65-77.

Article info

Received: October 25, 2023; Revised: December 13, 2023; Accepted: December 14, 2023.

Введение

Тяговый подвижной состав составляет около 30 % от стоимости основных фондов железных дорог. При этом существенную часть времени подвижной состав находится в состоянии технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [1, 2]. Для современного подвижного состава предъявляются достаточно жесткие ограничения ко времени нахождения на ТОиР, который в контрактах жизненного цикла нормируется на уровне не ниже 0,95 [3]. Соблюдение таких условий достаточно затруднено и требует научно-практического обоснования технических и

технологических подходов.

Надежность сложных технических систем во всем мире обеспечивается системой планово-предупредительных ТОиР [4–6] с широким использованием данных бортовых микропроцессорных систем управления и диагностирования и автоматизацией технологических процессов в сервисных депо [4, 7–12]. Современная система ТОиР требует научно-обоснованных технических решений [5, 6, 13]. Схема современного ТОиР представлена на рис. 1.

В процессе эксплуатации (блок 1) бортовая диагностика (блок 2) регистрирует парамет-

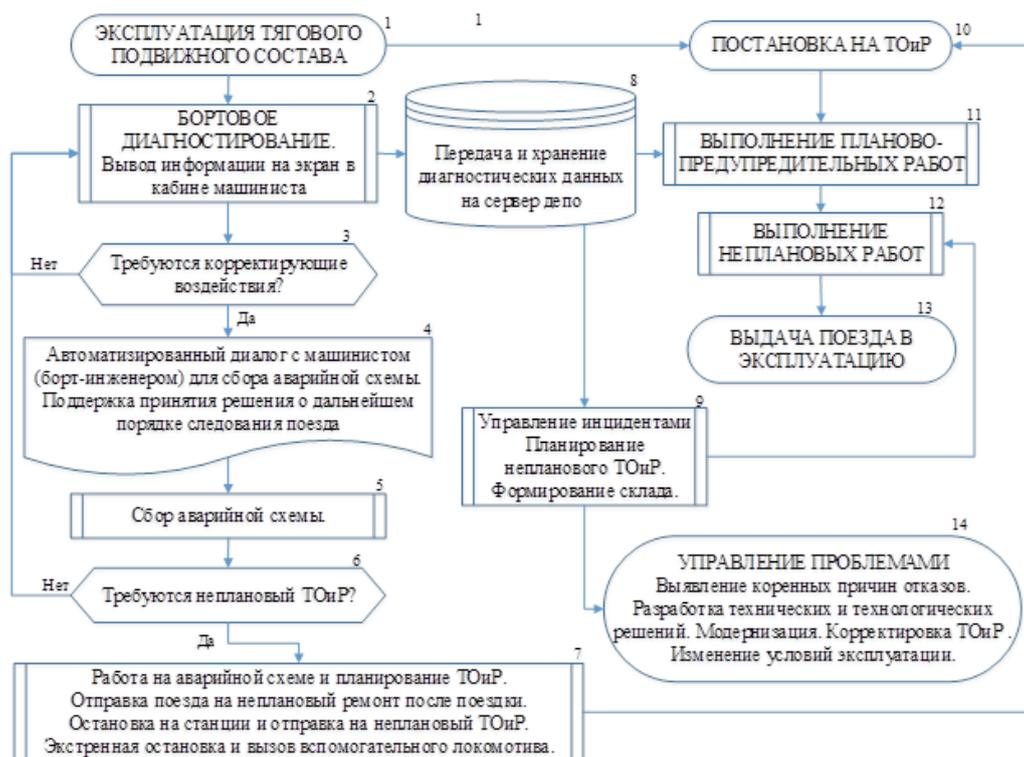


Рис. 1. Схема технического обслуживания и ремонта

Fig. 1. Maintenance and repair scheme

ры технического состояния состава, которые передаются в ситуационный центр депо (блок 8). Если техническое состояние состава требует вмешательства в управление (блок 3), то в диалоге с машинистом (блок 4) принимаются корректирующие меры вплоть до сбора аварийной схемы или остановки поезда (блок 5). Планируется при необходимости неплановый ремонт (блоки 6, 7) или все замечания устраняются на очередном планово-предупредительном ТОиР (блоки 10–12). В результате ТОиР накапливается статистическая информация, используемая как для устранения текущих инцидентов (блок 9), так и для управления выявленными проблемами в целом (блок 14).

Описанная система (см. рис. 1) внедрена в ООО «ЛокоТех», обслуживающем по договору с «РЖД» локомотивы заводов КЗ, НЭВЗ, БМЗ, входящих в Трансмашхолдинг [13], и эксплуатируется в 85 сервисных локомотивных депо при обслуживании около 20 тыс. секций электровозов серий ВЛ80, ВЛ10, ВЛ11, 2/3ЭС4К, ЭП2К, 2/3/4ЭС5К, ЭП1, тепловозов серий ТЭ10, ТЭ116, 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25К2М, ТЭМ2, ТЭМ18 и др. Выполнен комплекс научных исследований, связанных с диагностированием локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления и практическим использованием этих данных в автоматизированной системе управления ТОиР. В результате защищено

пять кандидатских диссертаций и две докторских [5, 6, 8–11].

Для изучения процессов ТОиР предложен метод имитационного математического моделирования постановки подвижного состава на ТОиР с применением теории массового обслуживания и сетей Петри, использование которых описано в статье.

Принципы управления техническим обслуживанием и ремонтом

Система ТОиР требует оптимизации параметров согласно [14]: более надежный подвижной состав дороже в изготовлении, но требует меньше затрат жизненного цикла на этапе эксплуатации (рис. 2). Снижение начальных затрат на изготовление приводит к повышению затрат на ТОиР. При организации ТОиР требуется решение задачи оптимизации начальных и эксплуатационных затрат. При этом главным показателем надежности является интенсивность отказов λ оборудования [4], которую принято считать величиной постоянной [15]: на этапе приработки интенсивность отказов $\lambda_{\text{ПР}}$ имеет значение, существенно превышающее установленное в технических условиях $\lambda_{\text{ТУ}}$ ($\lambda_{\text{ПР}} \gg \lambda_{\text{ТУ}}$), но постепенно снижается до установленного значения $\lambda_{\text{ПР}} \rightarrow \lambda_{\text{ТУ}}$. Когда $\lambda_{\text{ПР}} = \lambda_{\text{ТУ}}$, считается, что период приработки закончен и начинается период нормальной эксплуатации, когда $\lambda = \lambda_{\text{ТУ}} = \text{const}$ (рис. 3).

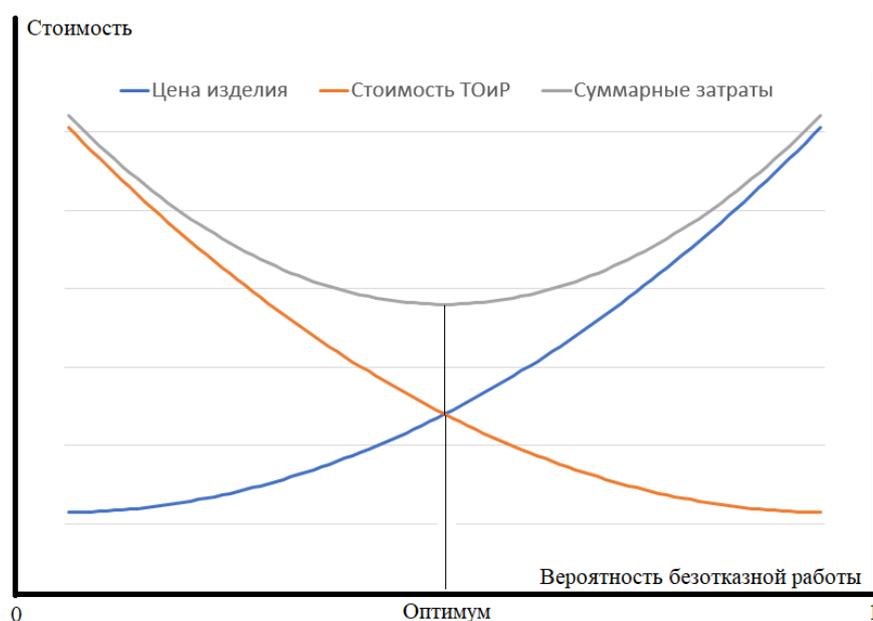


Рис. 2. Диаграмма Тагути
Fig. 2. Taguchi diagram



Рис. 3. Изменение интенсивности отказов на жизненном цикле оборудования

Fig. 3. Changes in failure rates during the life cycle of equipment

После выработки ресурса и деградации технического состояния оборудования интенсивность отказов вновь начинает расти $\lambda_{ДЕГ} > \lambda_{ТУ}$, $\lambda_{ДЕГ}(l) \rightarrow \infty$. При этом вероятность отказа Q при экспоненциальном распределении случайной величины определяется как интеграл за период времени от t_1 до t_2 или пробегу от l_1 до l_2 :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \lambda e^{-\lambda t} dt = \int_{l_1}^{l_2} \lambda e^{-\lambda l} dl,$$

где при $t \rightarrow \infty$ или $l \rightarrow \infty$ $Q \rightarrow 1$.

Понизить вероятность отказа Q можно сокращением периода пробега $\Delta l = l_2 - l_1$, что как раз возможно за счет системы ТОиР: вероятность безотказной работы $P = 1 - Q$ при проведении ТОиР повышается, однако может снижаться за счет предотказных состояний, не диагностируемых на ТОиР (рис. 4).

Вероятность отказа Q будет определяться по вероятности отказа до ТОиР $Q_{ТОиР}$ с интенсивностью $\lambda - \lambda_d$ и вероятности деградационного отказа Q_d с интенсивностью λ_d :

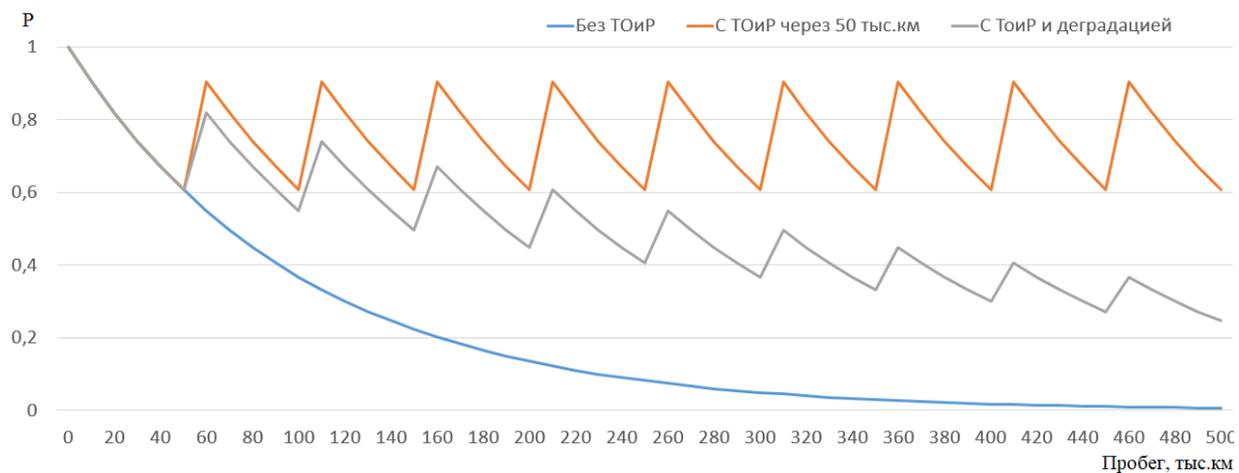
$$Q = Q_{ТОиР} + (1 - Q_{ТОиР}) \cdot Q_d.$$

Расчеты выполнены на алгоритмическом языке программирования Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel [16].

На рис. 5 приведен пример аналогичного расчета вероятности безотказной работы состава при пяти различных объемах ТОиР.

Разработка математической модели

Исходя из описанных принципов автором разработана имитационная математическая модель эксплуатации и обслуживания тягового подвижного состава на полигоне [12]. ТОиР осуществляется на пунктах технического обслуживания и депо с ограниченным числом

Рис. 4. Вероятность безотказной работы P при наличии технического обслуживания и ремонта и без таковых с присутствием деградационных отказовFig. 4. Probability of failure-free operation P in the presence of maintenance and repair and without them in the presence of degradation failures

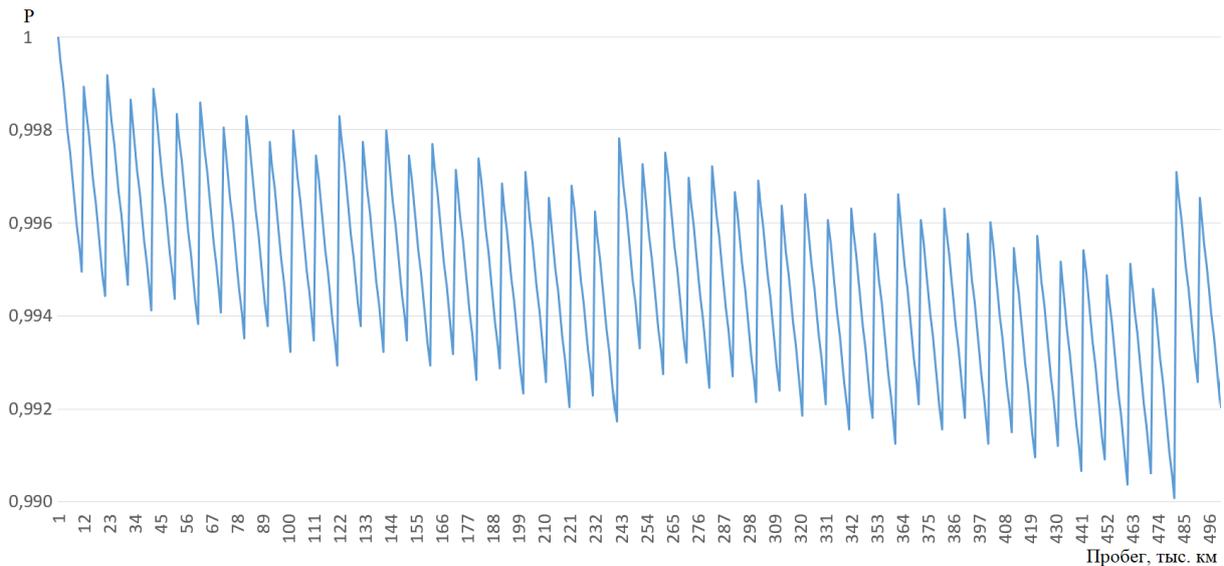


Рис. 5. Вероятность безотказной работы для пяти видов технического обслуживания и ремонта
Fig. 5. Probability of failure-free operation for five types of maintenance and repair

ремонтных позиций $n \in N$, наличием i -ых запасных изделий и приборов (ЗИП) $z_i \in Z_i$, трудовых и других j -ых ресурсов $r_j \in R_j$. Кроме того, время проведения ТОиР $t \in T$ ограничено выдачей составов «под нитки графика». Таким образом, организация ТОиР является типовой задачей теории массового обслуживания [17] – научной дисциплины математического моделирования типовых многократно повторяющихся, поддающихся статистической обработке задач. ТОиР как объект теории массового обслуживания характеризуется случайным и детерминированным поступлением заявок на обслуживание (входной поток заявок α с интенсивностью λ), каналами обслуживания $n \in N$ (числом ремонтных позиций), возможным наличием очереди на обслуживание $t_{ож} \in T_{ож}$, а также временем исполнения заявки $t \in T$ (временем проведения ТОиР) – выходящий поток заявок. Поток заявок с отказом в обслуживании исключается, так как выход неисправного подвижного состава из депо не допустим по соображениям безопасности движения поездов. Эффективность ТОиР можно оценить через следующие показатели Key Performance Indicators (KPI): вероятность P выполнения ТОиР в заданные сроки и с заданным уровнем затрат всех видов ресурсов C . Применительно к высокоскоростному движению показатель эффективности P приоритетней, чем C .

Составы U в процессе эксплуатации могут находиться в нескольких статусах (рис. 6).

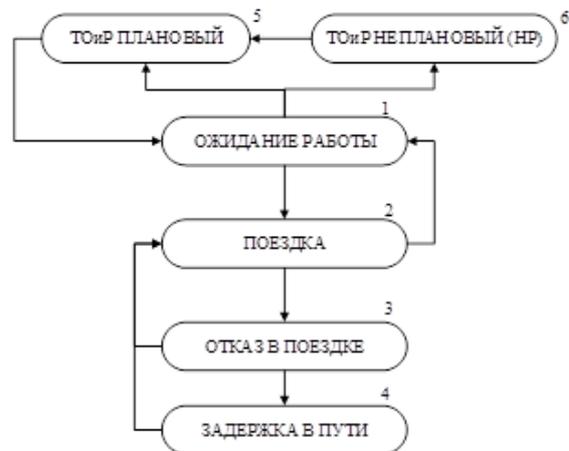


Рис. 6. Статусы состава в эксплуатации
Fig. 6. Statuses of trains in operation

Главный – это собственно эксплуатация: полезная работа в составе поездов. В данном статусе состав U находится в поезде Tr . Следующий статус – ожидание работы: состав находится в эксплуатируемом парке, но не совершает полезной работы. Третье основное состояние – ТОиР: состав выведен из эксплуатируемого парка и находится в депо на одном из плановых или на неплановом (НР) виде ТОиР. Статус состава U в момент времени $t+1$ определяется его статусом в момент времени t . Начальным статусом в момент времени t является исправное техническое состояние в ожидании работы. В момент времени $t+1$ состав U может быть поставлен на плановый (блок 5) или неплановый

(блок 6) ТООР на время $\Delta t_{\text{ТООР}}$ (см. рис. 6), если пробег состава критичный. Если в момент времени $t + 1$ состав U свободен и есть поезд Tr к отправлению, то состав подвязывается к этому поезду, после чего его статус – поездка (блок 2). Из статуса поездки поезд Tr с составом U (блок 2) состав может успешно завершить поездку (блок 1) или перейти в статус отказа (блок 3), в том числе с задержкой в поездке на время $\Delta t_{\text{отказ}}$ (блок 4).

При моделировании статусов состава время можно рассматривать как дискретную переменную, например, с точностью до минуты. Анализ показал, что для решаемой задачи определения параметров ТООР достаточно дискретности в один час:

$$(t + 1) - t = 1 \text{ ч.}$$

Такое изменение статусов хорошо описывается дискретной математической моделью, известной в литературе как универсальная временная стохастическая модель «сеть Петри», нашедшая широкое применение как раз при имитационном анализе систем массового обслуживания [18]. Таким образом, техническое состояние состава в момент времени $t + 1$ $U(t + 1)$ описывается логическо-математической функцией Z , зависящий от аргументов: преды-

дущего статуса состава $U(t)$, расписания поездов Tr с заданным временем оборота Δt_{Tr} и пробегом Δl , пробега состава L , периодичности планово-предупредительных ремонтов $Km_{\text{ТООР}}$, а также от случайного наступления отказа F со случайными продолжительностью Δt_F и временем восстановления $\Delta t_{F\text{ТООР}}$:

$$U(t + 1) = Z(U(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{\text{ТООР}}, F, \Delta t_F, \Delta t_{F\text{ТООР}}).$$

Моделирование сводится в последовательном переходе от времени t к времени $t + 1$ за каждые 24 часа суток $D \in \{1, DayMax\}$. Возможно задание статуса на несколько часов вперед на дискретное время Δt , например, при определенном времени поездки, ТООР и др. Модель ТООР является стохастической, так как наступление статуса отказа F в поездке, продолжительность задержки поезда в пути Δt_F , время восстановления после отказа на плановом или неплановом ремонте $\Delta t_{F\text{ТООР}}$ и даже продолжительность планового ТООР Δt_{Tr} являются случайными величинами, подчиняющимися различным законам распределения случайной величины: нормальному, экспоненциальному, логнормальному и др. В процессе моделирования участвует U_{max} составов, $TrainMax$ поездов в сутки и $KanavaMax$ ремонтных позиций депо. Таким обра-

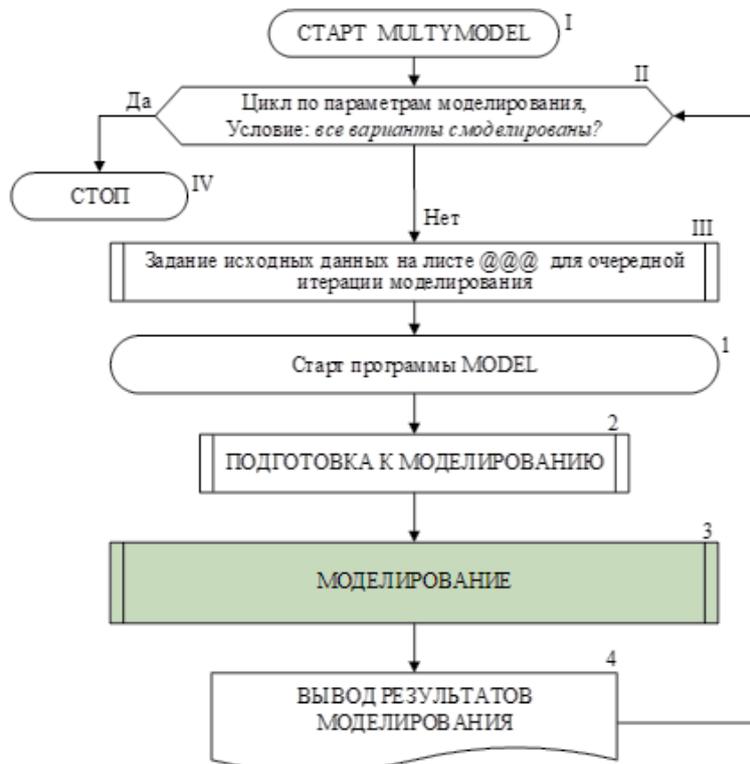


Рис. 7. Общая блок-схема алгоритма модели
Fig. 7. General block diagram of the model algorithm

зом, приведенная выше формула превращается в систему уравнений:

$$U_1(t+1) = Z(U_1(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{TOиP}, F, \Delta F, \Delta F_{TOиP});$$

$$U_2(t+1) = Z(U_2(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{TOиP}, F, \Delta F, \Delta F_{TOиP}); \dots$$

$$U_i(t+1) = Z(U_i(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{TOиP}, F, \Delta F, \Delta F_{TOиP}); \dots$$

$$U_{max}(t+1) = Z(U_{max}(t), Tr, \Delta t_{Tr}, \Delta t_L, L, Km_{TOиP}, F, \Delta F, \Delta F_{TOиP}).$$

Блок-схема алгоритма программы [15] для реализации разработанной модели ТОиР в среде Excel на алгоритмическом языке VBA приведена на рис. 7. После запуска программы (блок I) программа в цикле (блоки II–III, 1–4) меняет исходные данные на листе задания (блок II) и стартует функцию Model (блоки 1–4), которая последовательно производит подготовку к моделированию (блок 2), собственно моделирование (блок 3) и вывод информации на листы Excel (блок 4). Программа позволяет в цикле производить многочисленные итерации моделирования для накопления статистики или для факторного анализа.

Подготовка к моделированию начинается с очистки листов файла от предыдущей информации и формирования заголовков. Далее создаются и обнуляются рабочие массивы.

Далее считываются исходные данные: время моделирования в часах, виды ремонтов и межремонтные пробеги в километрах с нормируемым простоем в часах, число ремонтных позиций, число пар поездов в сутки, оборот «туда – обратно» в километрах и часах, строка в массиве *ResultList* для вывода результатов моделирования, задание выводить или нет данные на листы *UnitsList* и *DepoList* (для ускорения многоитерационного моделирования), доля интенсивности отказов от различных видов ТОиР, логнормальное вероятностное распределение продолжительности ремонтов и задержки рейсов, интенсивность отказов всех категорий, другие необходимые исходные данные. Затем запускается генератор случайных чисел *Randomize* и рассчитывается расписание по числу заданных пар поездов.

Расчеты в модели выполняются согласно алгоритму функцией *Model* (рис. 8), которая последовательно для каждого дня от первого до максимально заданного *DayMax* (блок 3.1) и для каждого часа суток (блок 3.2) выполняет проверку вернувшихся из поездки составов и

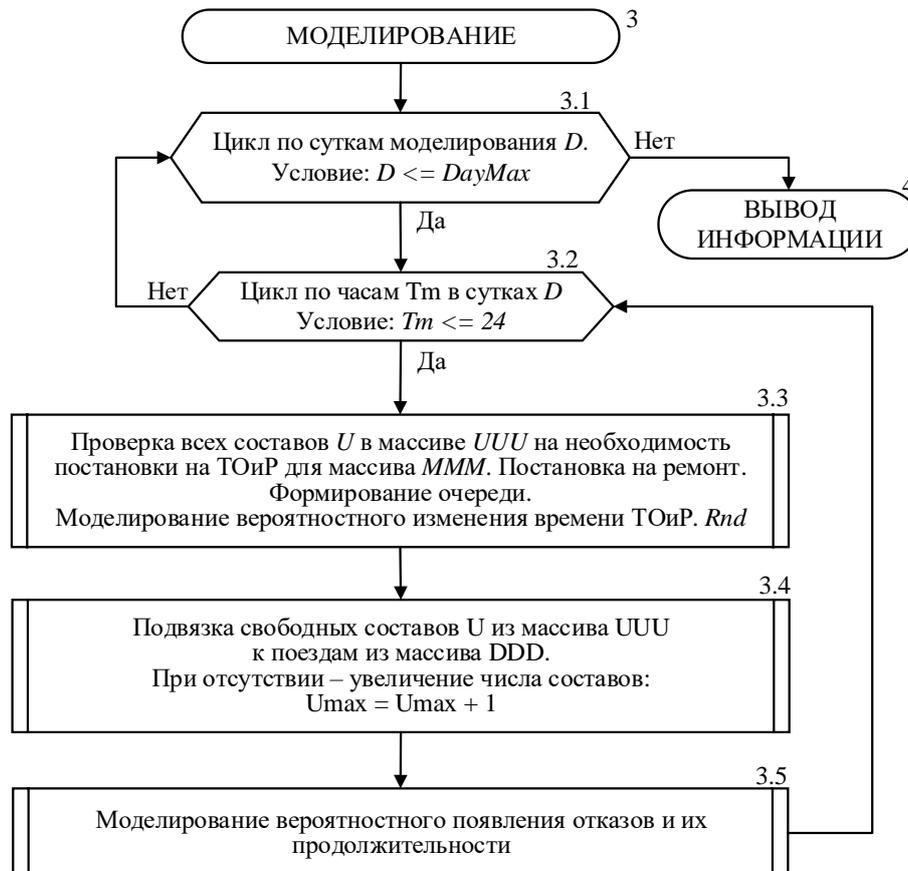


Рис. 8. Блок-схема одной итерации моделирования
Fig. 8. Flowchart of one simulation iteration

находящихся в состоянии ожидания работы необходимость их постановки на один из видов ремонта от большего к меньшему (блок 3.3). Не поставленные на ТОиР составы подвывает к поездам текущего часа отправления (блок 3.4). При отсутствии свободных составов их число увеличивается на один – в результате определяется минимально необходимое число составов. В поездке в случае задания моделируются отказы составов с заданными значениями интенсивностей λ (блок 3.5). Результаты моделирования выводятся на листы рабочего Excel-файла (блок 4).

Блок-схема алгоритма работы с ТОиР приведена на рис. 9. Работа начинается с цикла по всем составам U (блок 3.3.1) проверки на необходимость постановки на один из заданных видов ТОиР от больших к меньшему (блок 3.3.2). Если обнаружена необходимость постановки на ремонт (блок 3.3.2), то проверяется

наличие свободной ремонтной позиции (блок 3.3.3). Если позиция найдена, то на нее ставится состав (блок 3.3.7) для выполнения ТОиР.

Если свободных ремонтных позиций нет, то перед постановкой в очередь проверяется возможность отправки состава в поездку (блок 3.3.4) при условии, что за оборот пробег ΔL не превысит максимально допустимого для рассматриваемого вида ТОиР $L_{\text{ТОиР}}$ с учетом допуска на пробег $\Delta L_{\text{ТОиР}}$:

$$L_{\text{ТОиР}} + \Delta L_{\text{ТОиР}} \geq \Delta L.$$

Функция отправки состава в дополнительную поездку (блок 3.3.5) позволила повысить эффективность модели: сократить очередь и число потребных составов (до 20%). Если поездка по условию отсутствия перепробега не выполняется, то состав ставится в очередь (блок 3.3.6). В модуле управления ремонтами имеет стохастическую продолжительность ТОиР Δt : при заданном ожидаемом значении Δt

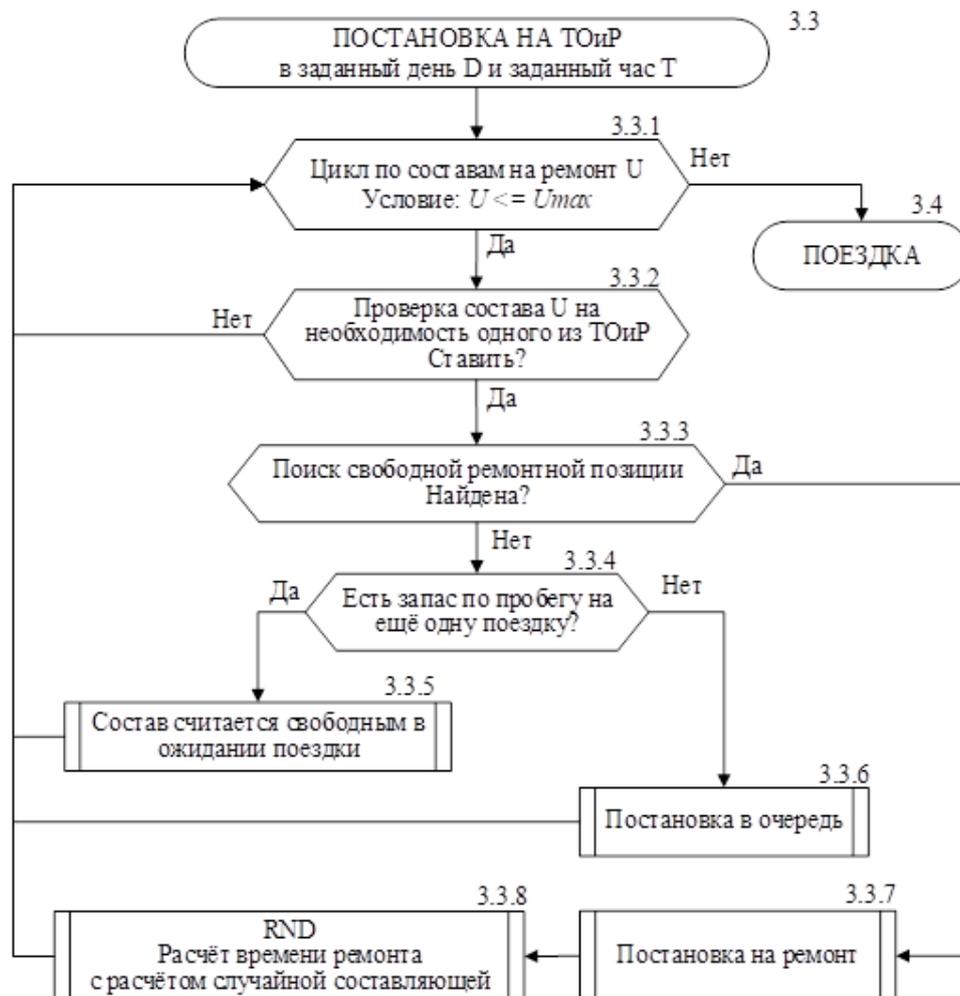


Рис. 9. Блок-схема выполнения технического обслуживания и ремонта

Fig. 9. Flowchart of maintenance and repair

преобразуется по заданному в начальных условиях преобразованию согласно логнормальному закону распределения случайной величины. Полученное значение Δt (блок 3.3.8) регистрируется в массивах UUU (составы) и DDD (ремонтные позиции). На этом работа с ТОиР в модели на текущий день и час заканчивается.

После моделирования ТОиР программа моделирует поездку (рис. 10). Последовательно для каждого поезда в расписании (блок 3.4.1) проверяется необходимость его отправки на текущий час Tm (блок 3.4.2). При наступлении времени отправления происходит поиск свободного состава в массиве UUU (блок 3.4.3). Если свободный состав найден (блок 3.4.4), то он подвязывается к поезду (блок 3.4.6). Если свободных составов больше одного, то выбира-

ется состав с минимальным пробегом (блок 3.4.4). Если свободных составов нет, то их число U_{max} увеличивается на один:

$$U_{max} = U_{max} + 1.$$

Новый состав подвязывается к поезду и отправляется в поездку (блок 3.4.6). Так определяется минимально потребное число составов. После отправки состава с поездом в поездку (блок 3.4.6) он считается занятым поездом Tr на время оборота Δt_{Tr} . При наступлении отката (блок 3.4.7 – моделирования отката) время поездки может быть увеличено согласно ожидаемому времени задержки с учетом его логнормального распределения. По окончании поездки через время Δt_{Tr} с учетом стохастической составляющей состав переводится в состояние ожидания работы. Цикл работы с очередным

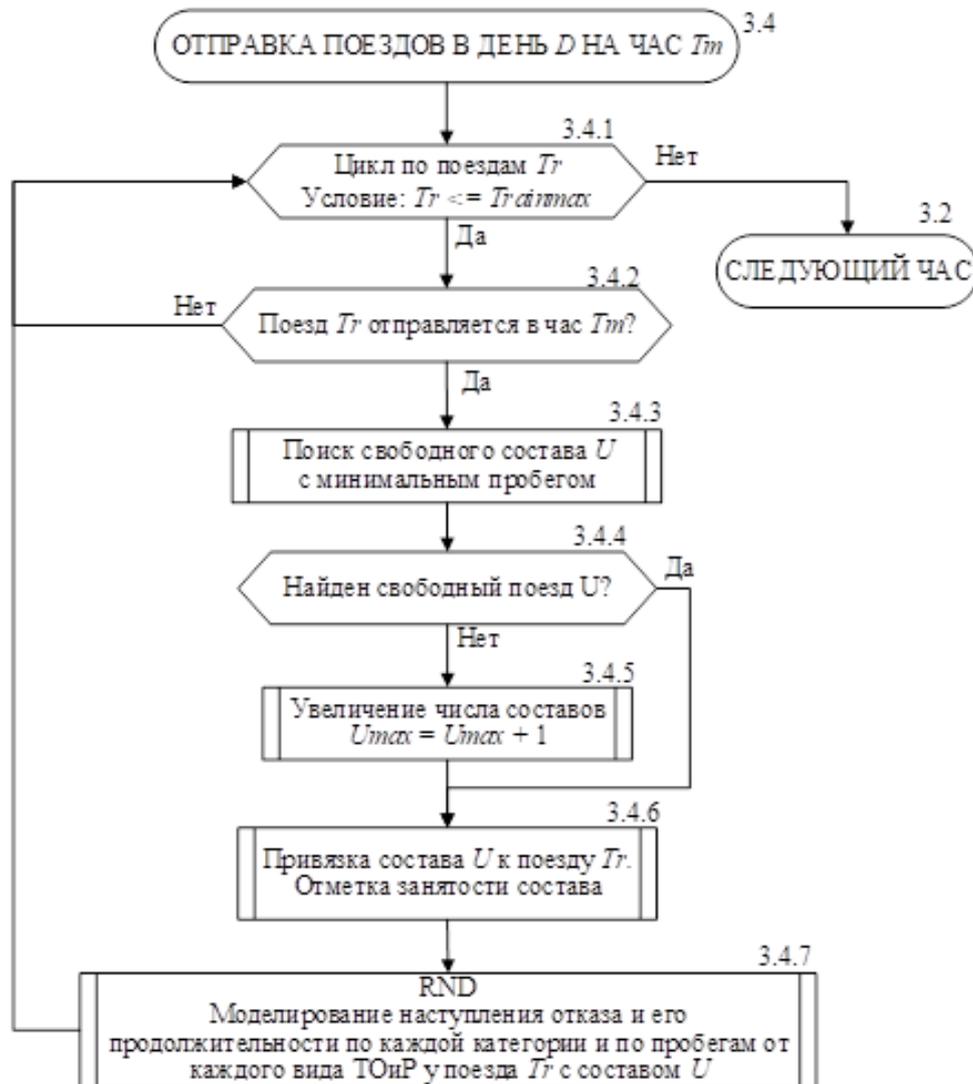


Рис. 10. Блок-схема моделирования поездки

Fig. 10. Trip Simulation Flowchart

часом T_m очередных суток D заканчивается. По окончании моделирования за заданные $DayMax$ дней результаты моделирования выводятся на рабочие листы таблицы.

Моделирование

По предложенной стохастической дискретной модели в виде сети Петри [19] в соответствии с канонами теории массового обслуживания выполнено многофакторное моделирование эксплуатации и ремонта перспективных высокоскоростных электропоездов для полигона Санкт-Петербург – Москва [20]. Далее приведен пример расчетов для 16-ти и 32-х пар поездов в

сутки при детерминированном и стохастическом моделировании (табл.). Полигон «туда – обратно» принят в 1 400 км при обороте за 7 ч (с учетом подготовки к поездке). Принято пять видов отказов, из которых только категория А приводит к задержке в пути ($\lambda_A = 0,5$ отк./млн км). При стохастическом моделировании выполнено по 100 итераций моделирования для расчета математического ожидания M , среднеквадратичного отклонения (СКО), коэффициента вариации K_V , минимально и максимально встречавшихся значений.

Статистические результаты моделирования
Statistical simulation results

Параметры Parameters	M (mathematical expectation)	СКО standard deviation	K_V Variation coefficient	min	max
Детерминированное, 16 пар поездов в сутки Deterministic, 16 pairs of trains per day					
Потребное число составов Required number of trains	15	–	–	–	–
В работе, % In operation, %	31,1	–	–	–	–
Ожидание работы, % Awaiting operation, %	66,09	–	–	–	–
Ремонт, % Repair, %	2,8	–	–	–	–
Коэффициент технической готовности Technical readiness coefficient	0,972	–	–	–	–
Занятость канав, % Ditch occupancy, %	5,24	–	–	–	–
Детерминированное, 32 пары поездов в сутки Deterministic, 32 pairs of trains per day					
Потребное число составов Required number of trains	22	–	–	–	–
В работе, % In operation, %	42,2	–	–	–	–
Ожидание работы, % Awaiting operation, %	53,97	–	–	–	–
Ремонт, % Repair, %	3,61	–	–	–	–
Коэффициент технической готовности Technical readiness coefficient	0,964	–	–	–	–
Занятость канав, % Ditch occupancy, %	9,91	–	–	–	–
Вероятностное, 16 пар поездов в сутки Probabilistic, 16 pairs of trains per day					
Потребное число составов Required number of trains	15,41	0,57	0,037	15	17
В работе, %	30,34	1,07	0,036	27,46	31,13

In operation, %					
Ожидание работы, % Awaiting operation, %	66,76	1,19	0,018	65,89	70,26
Ремонт, % Repair, %	2,90	0,14	0,047	2,27	2,98
Коэффициент технической готовности Technical readiness coefficient	0,971	0,001	0,001	0,97	0,977
Занятость канав, % Ditch occupancy, %	5,25	0,168	0,032	4,49	5,40
Очередь, составов Queue, trains	0,31	0,643	2,075	0	2
Очередь, % Queue, %	0,08	0,023	2,830	0	0,12
Число отказов категории А Number of category A failures	20,86	4,06	0,194	11	28
Интенсивность при моделировании, отк./млн км Simulation intensity, failures/million km	0,503	0,098	0,195	0,265	0,676
Погрешность модели, % Model error, %	0,6	–	–	–	–
Число задержек поездов Number of train delays	20,74	4,007	0,193	10	32
Вероятность соблюдения расписания дви- жения поездов Probability of keeping train schedules	0,993	0,00014	0,00014	0,99892	0,9996
Вероятностное, 32 пары поездов в сутки Probabilistic, 32 pairs of trains per day					
Потребное число составов Required number of trains	23,08	0,52	0,023	22	25
В работе, % In operation, %	40,5	0,91	0,022	37,3	42,4
Ожидание работы, % Awaiting operation, %	56,0	1,01	0,018	53,7	59,3
Ремонт, % Repair, %	3,49	0,12	0,033	3,30	3,84
Коэффициент технической готовности Technical readiness coefficient	0,965	0,001	0,001	0,961	0,967
Занятость канав, % Ditch occupancy, %	9,43	0,165	0,017	9,27	9,92
Очередь, составов Queue, trains	0,51	0,66	1,29	0	2
Очередь, % Queue, %	0,009	0,023	2,57	0	0,121
Число отказов категории А Number of category A failures	40,8	5,63	0,138	30	54
Интенсивность при моделировании, отк./млн км Simulation intensity, failures/million km	0,492	0,068	0,138	0,362	0,651
Погрешность модели, % Model error, %	1,6				
Число задержек поездов Number of train delays	42	5,76	0,137	32	54
Вероятность соблюдения расписания дви- жения поездов Probability of keeping train schedules	0,9993	0,00009	0,0001	0,9991	0,9995

Заключение

Использование модели для анализа эффективности эксплуатации и обслуживания составов высокоскоростных перспективных отечественных электропоездов показало высокую эффективность предложенного методического подхода и соответ-

ствующего разработанного программного обеспечения [15]. Исследования с использованием предложенного метода и разработанного программного обеспечения будут продолжены.

Список литературы

1. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Введ. 2017–09–01. М. : Стандартинформ, 2017. 16 с.
2. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В.А. Гапанович, В.Е. Андреев, Митрохин Ю.В. и др. М. : ИРИС-ГРУПП, 2012, 575 с.
3. Когда и как заключать контракт жизненного цикла: новые случаи применения с 2022 года // Госконтракт : сайт. URL : <https://goscontract.info/kontrakt/izuchaem-kontrakty-zhiznennogo-tsikla> (Дата обращения: 23.10.2023).
4. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. Введ. 2022–01–01. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 40 с.
5. Семёнов А.П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2021. 379 с.
6. Пустовой И.В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2018. 181 с.
7. Грачев В.В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов : дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 2019. 434 с.
8. Лакин И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 195 с.
9. Аболмасов А.А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания : дис. ... канд. техн. наук. М., 2017. 180 с.
10. Хромов И.Ю. Анализ влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 187 с.
11. Мельников В.А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления : дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 210 с.
12. Свидетельство № 2023663017. Модель технического обслуживания и ремонта скоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики / И.И. Лакин. № 2023660448 : заявл. 23.05.2023 ; опубл. 19.06.2023.
13. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К.В. Липа, А.А. Белинский, В.Н. Пустовой и др. М. : Локомотивные Технологии, 2015. 212 с.
14. Методы Тагути // Центр Креативных Технологий : сайт. URL : <https://www.inventech.ru/pub/methods/metod-0030/> (Дата обращения 23.10.2023).
15. Горский А.В., Воробьёв А.А. Надежность электроподвижного состава. М. : Маршрут, 2005. 303 с.
16. Семченко В.В., Мальцев Е.А., Раздобаров А.В. Опыт внедрения системы мониторинга технического состояния и режимов работы электровозов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : труды Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Красноярск, 2020. С. 327–332.
17. Уокенбах Д. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA. М., СПб., Киев : Диалектика, 2012. 944 с.
18. Плескунов М.А. Теория массового обслуживания. Екатеринбург : УрФУ, 2022. 264 с.
19. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М. : Мир, 1984. 264 с.
20. Дороги на высоких скоростях // Ведомости. Промышленность : сайт. URL : https://www.vedomosti.ru/industry/infrastructure_development/articles/2023/11/29/1008492-dorogi-na-visokih-skorostyah (Дата обращения 23.10.2023).

References

1. GOST 18322-2016. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhniki. Terminy i opredeleniya [State Standard 18322-2016. Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2017. 16 p.
2. Gapanovich V.A., Andreev V.E., Mitrokhin Yu.V., Yagovkin A.N., Ivanov K.V., Alferov V.Yu., Kiselev V.I., Lakin I.K., Ivanov A.A. Eksploatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie podvizhnogo sostava [Operation and maintenance of rolling stock]. Moscow: IRIS-GRUPP Publ., 2012. 575 p.
3. Kogda i kak zaklyuchat' kontrakt zhiznennogo tsikla: novye sluchai primeneniya s 2022 goda (elektronnyi resurs) [When and how to conclude a life cycle contract: new applications from 2022 (electronic resource)]. Available at: <https://goscontract.info/kontrakt/izuchaem-kontrakty-zhiznennogo-tsikla> (Accessed October 23, 2023).
4. GOST R 27.102-2021. Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob'ekta. Terminy i opredeleniya [State Standard R 27.102-2021. Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions]. Moscow: Rossiiskii institut standartizatsii Publ., 2021. 40 p.
5. Semenov A.P. Model' upravleniya zhiznennym tsiklom lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Model of locomotive life cycle management using modern methods of technical diagnostics]. Doctor's thesis. Moscow, 2021. 379 p.

6. Pustovoi I.V. Razrabotka informatsionno-dinamicheskoi modeli upravleniya servisnym tekhnicheskim obsluzhivaniem i remontom lokomotivov [Development of an information-dynamic management model for maintenance and repair of locomotives]. Ph.D.'s thesis. Omsk, 2018. 181 p.
7. Grachev V.V. Nauchnye osnovy primeneniya metodov intellektual'nogo analiza dannykh dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov [Scientific bases of application of data mining methods for monitoring the technical condition of locomotives]. Doctor's thesis. Saint Petersburg, 2019. 434 p.
8. Lakin I.I. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmnykh kompleksov [Monitoring of the technical state of locomotives according to on-board hardware-software complexes]. Ph.D.'s thesis. Moscow: MIIT, 2016. 195 p.
9. Abolmasov A.A. Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviyakh servisnogo obsluzhivaniya [Technical state management of the traction rolling stock in the conditions of service maintenance]. Ph.D.'s thesis. Moscow: MIIT, 2017. 180 p.
10. Khromov I.Yu. Analiz vliyaniya rezhimov ekspluatatsii na tekhnicheskoe sostoyanie lokomotivov [Analysis of the influence of operating modes on the technical condition of locomotives]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2021. 187 p.
11. Mel'nikov V.A. Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya teplovozov 2TE116U s primeneniem dannykh bortovykh sistem upravleniya [Improvement of methods for diagnosing diesel locomotives 2TE116U using data from on-board control systems]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2022. 210 p.
12. Lakin I.I. Certificate of registration of a computer program 2023663017, 19.06.2023.
13. Lipa K.V., Belinskii A.A., Pustovoi V.N. et al. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika [Monitoring of technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practice]. Moscow: Lokomotivnye Tekhnologii Publ., 2015. 212 p.
14. Metody Taguti (Elektronnyi resurs) [Taguchi Methods (electronic resource)]. Available at: <https://www.inventech.ru/pub/methods/metod-0030/> (Accessed October 23, 2023).
15. Gorskii A.V., Vorob'ev A.A. Nadezhnost' elektropodvizhnogo sostava [Reliability of electric rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 303 p.
16. Semchenko V.V., Maltsev E.A., Razdobarov A.V. Opyt vnedreniya sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov raboty elektrovozov [Monitoring system experience for the technical condition and operating modes of electric locomotives]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Ekspluatatsiya i obsluzhivanie elektronnoy i mikroprotessornoy oborudovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation «Operation and maintenance of electronic and microprocessor equipment of traction rolling stock»]. Krasnoyarsk, 2020, pp. 327–332.
17. Walkenbach J. Excel 2010: professional'noe programmirovaniye na VBA [Excel 2010: professional programming in VBA]. Moscow, Saint Petersburg, Kiev: Dialektika Publ., 2012. 944 p.
18. Pleskunov M.A. Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Theory of queuing]. Ekaterinburg: UrFU Publ., 2022. 264 p.
19. Peterson J.L. Teoriya setei Petri i modelirovaniye sistem [Petri net theory and the modeling of systems]. Moscow: Mir Publ., 1984. 264 p.
20. Dorogi na vysokikh skorostyakh (Elektronnyi resurs) [Roads at high speeds (Electronic resource)]. Available at: https://www.vedomosti.ru/industry/infrastructure_development/articles/2023/11/29/1008492-dorogi-na-visokih-skorostyah (Accessed October 23, 2023).

Информация об авторах

Лакин Игорь Игоревич, кандидат технических наук, ведущий эксперт группы интеграции систем управления, диагностики, безопасности и радиосвязи, Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта, г. Москва; e-mail: Lakin16@mail.ru.

Семченко Виктор Васильевич, кандидат технических наук, генеральный директор АО «Дорожный центр внедрения Красноярской железной дороги», г. Красноярск; e-mail: office@dcv.ru.

Information about the authors

Igor' I. Lakin, Ph.D. in Engineering Science, Leading expert of the Control, Diagnostic, Safety and Radio Communication Systems Integration Group, Railway Engineering Center, Moscow; e-mail: lakin16@mail.ru.

Victor V. Semchenko, Ph.D. in Engineering Science, General Director of JSC «Road Center for the implementation of the Krasnoyarsk Railway», Krasnoyarsk; e-mail: office@dcv.ru.