

УДК 629.423.25

Моделирование технического обслуживания и ремонта высокоскоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики

А. Н. Галахов, И. И. Лакин, Д. Д. Скворцов

АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта», Российская Федерация, 121205, Москва, Территория Сколково Инновационного Центра, Большой б-р, 5

Для цитирования: Галахов А. Н., Лакин И. И., Скворцов Д. Д. Моделирование технического обслуживания и ремонта высокоскоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 52-67. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-52-67

Аннотация

Цель: Высокоскоростные магистрали (ВСМ) — самое перспективное направление развития железнодорожного транспорта в XXI веке, повышающее мобильность населения на расстоянии до 1000 км, способствующее развитию городских конгломераций. Для функционирования ВСМ необходим надежный подвижной состав. В статье описывается выполненное математическое моделирование эксплуатации и системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) высокоскоростных электропоездов применительно к полигону Санкт-Петербург — Москва. Целью моделирования является обоснование требований к ТОиР, в том числе к назначению бортовых автоматизированных систем технического диагностирования. **Методы:** В основу положены принципы организации пассажирского движения, технические требования к отечественному высокоскоростному подвижному составу, методы теории массового обслуживания, а также вероятностные математические методы моделирования в среде MS Excel на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications. Разработано соответствующее программное обеспечение. **Результаты:** Разработаны математическая модель и программное обеспечение, выполнено многофакторное моделирование, определена степень влияния отказов на потребный парк высокоскоростных электропоездов. Предложены методы оптимизации технического обслуживания для сокращения парка. Определены требования к самой модели. Математическим моделированием выполнен факторный анализ эксплуатации и технического обслуживания. **Практическая значимость:** Гарантией безопасного и надежного высокоскоростного движения является создание современной системы технического обслуживания и ремонта подвижного состава. Исследование взаимодействия эксплуатации и ремонта важно при подготовке к запуску отечественного высокоскоростного движения.

Ключевые слова: Железные дороги, высокоскоростные магистрали, подвижной состав, техническое обслуживание и ремонт, математическое моделирование.

Введение

Высокоскоростные магистрали (ВСМ) — одно из основных направлений развития железнодорожного транспорта, обеспечивающее мобильность населения на расстоянии до 1000 км, способствующее развитию городских конгломераций. Лидером в развитии являются Китай, Япония, Франция, Германия, другие европейские страны. Во всех этих государствах отдельно решалась задача технического

обслуживания и ремонта (ТОиР) высокоскоростного тягового состава. Эта задача стоит и в РФ при создании отечественных ВСМ.

Надежность подвижного состава обеспечивается при соблюдении стратегии обслуживания и ремонта (ТОиР) [1] — «совокупность взаимосвязанных средств, документации ТОиР и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления эксплуатационных характеристик объектов» [2]. Основное место проведения ТОиР — сервисное депо или пункт технического обслуживания (ПТО). В мировой практике современный ТОиР строится с использованием бортовых автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) на базе микропроцессорных систем управления [3], которые выявляют пред-отказные состояния и сокращают время простоя на ТОиР. Информация АСТД по радиоканалу (в отдельных случаях с помощью flash-накопителей) передается на сервер АСУ ТОиР сервисного депо. Одновременно информация выводится на экран человеко-машинного интерфейса локомотивной бригады по запросу или автоматически при необходимости принять корректирующие воздействия на систему управления поезда.

При постановке поезда на ТОиР выполняется набор планово-предупредительного ТОиР с учетом данных АСТД. Таким образом, при организации современного ТОиР высокоскоростных поездов возникают две дополнительные задачи, требующие своего решения:

- получить от АСТД достоверную информацию о техническом состоянии оборудования электропоезда: электрического, пневматического, электронного, электрических машин и экипажной части;

- обеспечить процесс ТОиР необходимыми запасными частями и материалами для оперативного крупно-агрегатного ТОиР.

Задачи организации ТОиР с использованием данных АСТД подробно рассмотрены применительно к локомотивам в двух докторских диссертациях [3, 4] и ряде кандидатских [5–7]. Также рассмотрены особенности организации ТОиР при наличии данных АСТД [3, 8]. ТОиР высокоскоростных электропоездов отличается от ТОиР локомотивов. Для анализа процессов ТОиР авторами выполнено моделирование эксплуатации и выполнения ТОиР, для чего смоделированы:

- эксплуатация высокоскоростных электропоездов на замкнутом полигоне с расчетом пробега как фактора постановки на планово-предупредительный ремонт для полигона Санкт-Петербург — Москва;

- детерминированные процессы системы ТОиР;

- вероятностные процессы возникновения отказов в эксплуатации;

- вероятностная задержка поезда в поездке из-за отказа;

- вероятностное время непланового ремонта после отказа на линии;

- вероятностное время задержки планового ТОиР;

- уменьшение вероятности отказа за счет использования данных бортовых систем технического диагностирования.

Возможности пунктов технического обслуживания (ПТО) и депо (ТЧ) по осуществлению ТОиР ограничены числом ремонтных позиций $n \in N$, наличием i -того ЗИП $z_i \in Z$, трудовых и других j -тых 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 (теории очередей) [9] по статистике эксплуатации и ТОиР, которое характеризуется детерминированным и случайным поступлением заявок на обслуживание (поток заявок α с интенсивностью λ), ремонтными позициями $n \in N$, наличием очереди на обслуживание $t_{\text{ож}} \in T_{\text{ож}}$, а также временем исполнения заявки $t \in T$.

Разработка алгоритма модели

На рис. 1 приведен пример: 12 заявок ТОиР для ремонтных позиций $n \in N = 5$. Каждое обслуживание имеет продолжительность обслуживания $t_{\alpha} \in T$. Первые 7 заявок приняты в работу без ожиданий при различной продолжительности ТОиР, но не превышено допустимое время T_{MAX} . Для заявок $n = 8$ и $n = 12$ нет свободных ремонтных позиций, и возникло ожидание ТОиР $t_{\text{ож}8}$ и $t_{\text{ож}12}$. В результате появился риск превышения допустимого времени ТОиР T_{MAX} : $T_{\text{MAX}} < t_8 + t_{\text{ож}8}$, $T_{\text{MAX}} < t_{12} + t_{\text{ож}12}$. При ограниченном числе ремонтных позиций есть риск задержки выдачи поезда после ТОиР как по причине ожидания свободной ремонтной позиции ($t + t_{\text{ож}} > T_{\text{MAX}}$), так и при длительном обслуживании ($t > T_{\text{MAX}}$). Число ремонтных позиций N рассчитывается по ожидаемому потоку заявок на ТОиР и ожидаемой продолжительности обслуживания T :

$$\sum_{n=1}^N tn \leq N \cdot T_{\text{MAX}}. \quad (1)$$

Для анализа процессов ТОиР авторами разработана модель ТОиР в среде Excel на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications [10]. Для моделирования взяты планируемые параметры отечественных высокоскоростных поездов [11]. Проекты разработаны в Инжиниринговом центре железнодорожного транспорта [12].

Виды отказов [11] разделены на 5 категорий с допустимыми интенсивностями отказов λ . Категория A : невозможность дальнейшего движения поезда, $\lambda_A \leq 0,5$ отк/млн км. Категория B : опоздание свыше 20 минут, проведение непланового ремонта (НР), $\lambda_B \leq 3$ отк/млн км. Категория C : задержка до 20 минут и без НР с возможным увеличением времени планового ТОиР, $\lambda_C \leq 25$ отк/млн км. Категория K : ремонт на плановых ТОиР после отказа в салоне устройств комфорта, $\lambda_K \leq 8$ отк/млн км. Категория D : наличие сверхцикловых работ, $\lambda_D \leq 200$ отк/млн км. При моделировании обобщенные интенсивности, приводящие к неплановым ремонтам $\lambda_{\text{НР}}$ и увеличению продолжительности ТОиР $\lambda_{\text{ЦИ}}$:



Рис. 1. Пример простейшей очереди обслуживания на ТОиР

ТАБЛИЦА 1. Нормируемые простои на ТОиР при моделировании

Вид ТОиР	Пробег, км	Период	Период, ч	Простой, ч
L	8000 ± 10 %	1 неделя	168	1
N	20 000 ± 20 %	0,5 месяца	360	4
IS510	120 000 ± 20 %	3 месяца	2160	11
IS520	240 000 ± 20 %	6 месяцев	4380	23
IS530	480 000 ± 20 %	1 год	8760	35

$$\lambda_{HP} = \lambda_A + \lambda_B \leq 3,5 \text{ отк/млн км};$$

$$\lambda_{CC} = \lambda_C + \lambda_D + \lambda_K = 233 \text{ отк/млн км.}$$

Плановые ТОиР обеспечивают коэффициент технической готовности КГЭ ≥ 0,96, установлены нормы простоя на ТОиР (табл. 1). ТОиР планируется выполнять в Депо для высокоскоростных поездов в Обухово или в уже существующем депо «Металлострой». Число ремонтных позиций следует определить с использованием теории очередей. Моделирование выполнено с помощью специально разработанной программы в среде MS Excel на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) [10] (рис. 2), на которую получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [13].

Разработанная модель (рис. 2) после подготовки рабочих массивов и считывания исходных данных (блоки 2 и 3) за заданное число дней D (блок 4) на каждый час суток T_m (блок 5) все составы U (блок 6) проверяются на необходимость ТОиР по пробегу (блоки 6–11). При отсутствии свободных ремонтных позиций состав ставится в очередь (блок 9). Далее определяется наличие отправления поездов

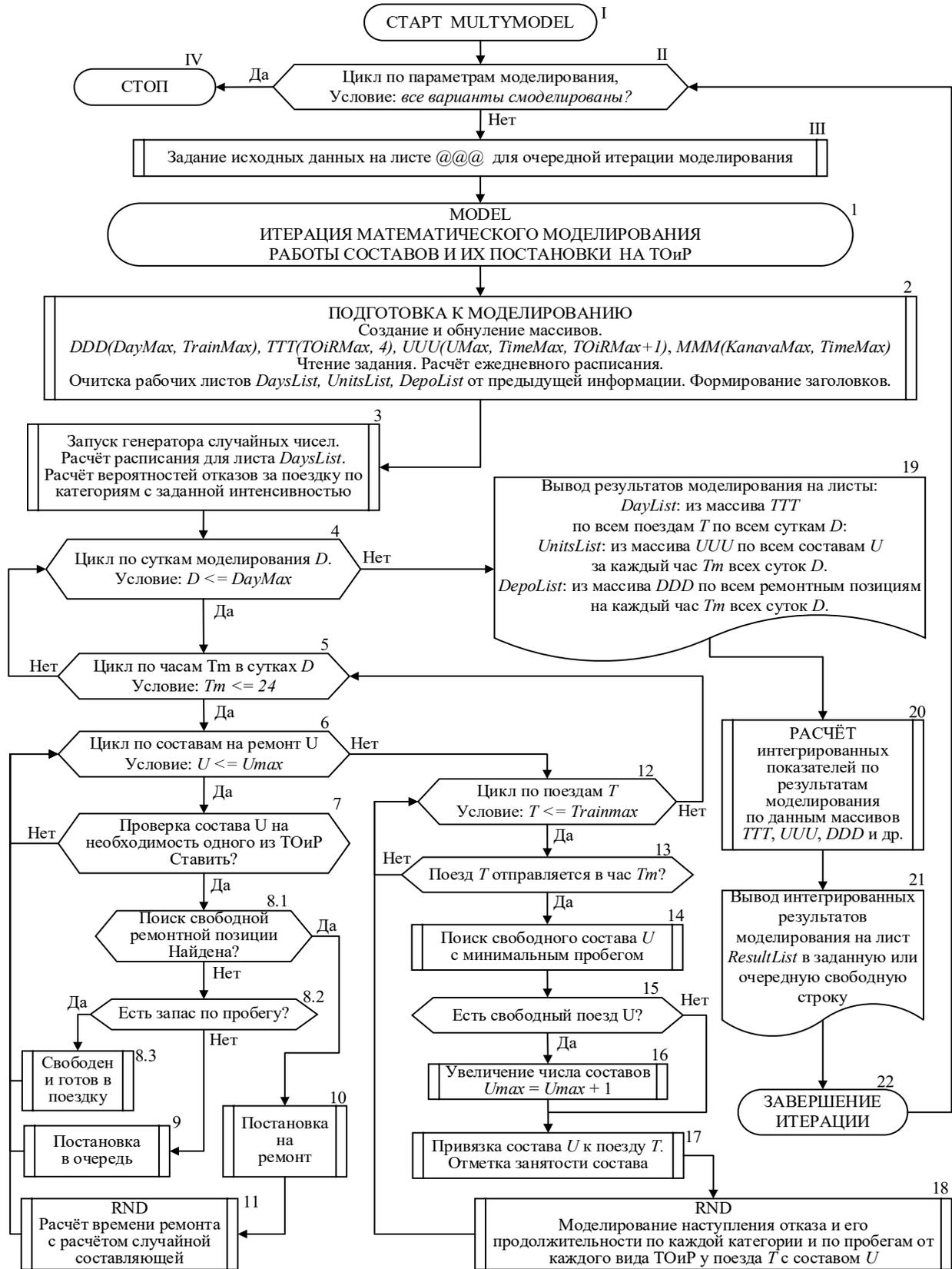


Рис. 2. Блок-схема алгоритма модели

T на текущий час T_m (блоки 12–18) и наличие свободных составов для подвязки (блоки 14–17). В случае необходимости число потребных составов U_{\max} увеличивается: $U_{\max} = U_{\max} + 1$ (блок 16). По окончании моделирования за заданные D_{\max} дней (блоки 4–18) информация из рабочих массивов выводится в рабочие листы Excel (блоки 19–21). В программе предусмотрена возможность многоитерационного моделирования (блоки I–IV).

Фиксировалось максимальное число реально использованных ремонтных позиций N_{\max} в сравнении с заданным N : если $N > N_{\max}$, значит, в задании задано избыточное число ремонтных позиций N . Аналогично определялась максимальная очередь Q . Если $Q = 0$ и $N = N_{\max}$, значит, условия моделирования заданы оптимально. Процент нахождения в очереди $Q_{\%}$ от общего времени нахождения на ТОиР определялось по формуле:

$$Q_{\%} = 100 \sum_{t=1}^{TimeMax} (MMM(0, t) / N), \quad (2)$$

где $MMM(0, i)$ — число составов в очереди на момент времени t .

По разработанной программе выполнен анализ свойств детерминированной модели применительно к полигону высокоскоростного движения Санкт-Петербург — Москва. Оборот поезда принят как происходящий за 5 часов с пробегом 1400 км. Число пар поездов: от 1 до 34 и число ремонтных позиций: от 3 до 7.

Полученные зависимости от числа пар поездов оказались неожиданно нелинейными (рис. 3) из-за возникновения очереди на «тяжелые» виды ТОиР: IS510, IS520, IS530. Одновременное начало эксплуатации всех составов приводит к их практически одновременной постановке на ТОиР, что на практике можно избежать. Программу моделирования доработали с учетом того, что: постановка на эти виды ремонта допускает разброс 20 %: для IS510 составит 48 тыс. км, для IS520 — 96 тыс. км, для IS530 — 192 тыс. км. Значит, составы при постановке на тяжелые ремонты можно искусственно разнести во времени. В программе введен запрет на одновременную постановку более двух составов на эти виды ремонта.

Дополнительно введена защита для ремонта объема L : если при пробеге 7999 км поезд будет отправлен в поездку, то его пробег составит $7999 + 1400 = 9399$ км, что превысит допуск $8000 + 3 \cdot 267 = 8800$ км. Поэтому проверка постановки на ремонт объема L осуществляется по пробегу $8000 - 3 \cdot 267 = 7200$ км. Результаты моделирования приведены на рис. 4. До 18 пар поездов процесс линейный. Далее наблюдаются флуктуации из-за очередей на ремонт. Оптимальными оказались параметры для 19, 22 и 25 пар поездов, при которых процент использования составов был выше 40 % (рис. 5). Дополнительное снижение эффективности использования составов связано с перерывом движения в ночное время с 22:00 до 6:00.



Рис. 3. Зависимость числа требуемых составов от числа пар поездов при $N = 5$ максимальном числе ремонтных позиций



Рис. 4. Результаты моделирования для семи ремонтных позиций

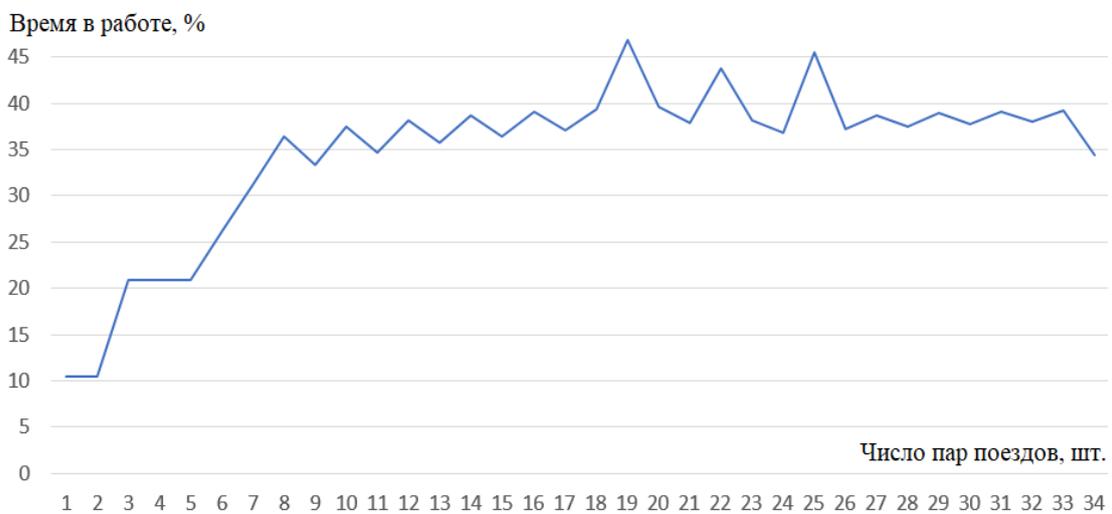


Рис. 5. Эффективность использования подвижного состава

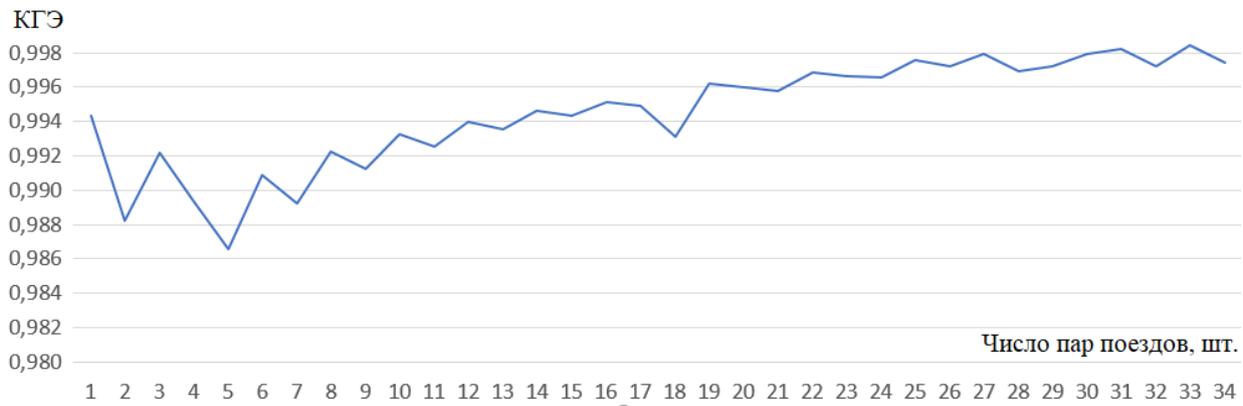


Рис. 6. Коэффициент готовности к эксплуатации

При отсутствии отказов и задержек на ТОиР коэффициент готовности к эксплуатации при числе пар поездов свыше 8 $КГЭ > 0,99$ (рис. 6) при установленном $КГЭ_{\text{норм}} \geq 0,96$ — есть резерв при появлении отказов. В результате детерминированного моделирования выбрано 22 пары поездов при 5 ремонтных позициях.

В VBA предусмотрена возможность работы со случайными числами, которая инициализируется командой *Randomize* [10]. Случайное число x вызывается командой *Rnd*: $x = Rnd$: в VBA есть достаточный набор функций для моделирования процессов ТОиР с вероятностным наступлением отказа и временем задержки поезда, продолжительностью восстановления после отказа на плановых и неплановых ТОиР. В блок-схеме по рис. 2 вероятностному моделированию соответствуют блоки 11 и 18.

Вероятность наступления отказа P определяется как интеграл по функции плотности экспоненциального закона распределения случайной величины λ от пробега L . После выбора состава под очередной поезд запускается генератор случайных чисел и рассчитывается теоретическая вероятность наступления отказа P_T : $0 \leq P_T \leq 1$. Вычисляется случайное число $R = Rnd$: $0 \leq R \leq 1$. Если $R \leq P_T$, то отказ считается наступившим. Для тестирования предложенной методики последовательно смоделировано 1 тыс. отказов для $\lambda = 3$ и пробега $L = 20$ тыс. км. Расчет повторен 10 тыс. раз. В результате средняя интенсивность отказов составила $\lambda_{\text{CP}} = 0,0582357$ отк/млн км при теоретическом значении $\lambda_T = 0,0582267$ отк/млн км. Разброс составил 0,015 % — предложенная методика допустима.

В модели предусмотрены несколько категорий отказов со своими интенсивностями отказов. На момент времени t вероятность отказа Q считается как вероятность отказов $Q_L, Q_N, Q_{510}, Q_{520}, Q_{530}$ по формуле:

$$Q = Q_L + \sum_{i=2}^6 (1 - Q_{\Sigma}) Q_i, \quad (3)$$

где Q_{Σ} — вероятность отказа по предыдущим пробегам.

Результаты вероятностного моделирования

Для 22 пар поездов в сутки, для полигона Санкт-Петербург — Москва («туда-обратно» в 1400 км за 5 часов) для 6 ремонтных позиций депо с показателями надежности и периодичности ТОиР согласно техническому заданию на ВСМ выполнено многоитерационное моделирование (см. блоки I–IV на рис. 2) для накопления статистики с расчетом математического ожидания M , среднеквадратичного отклонения σ и коэффициента вариации K_V параметров модели. Моделирование выполнено за 1095 дней (три года).

При моделировании для 50 итераций зафиксировано от 6 до 23 отказов категории A ($M = 15,54$, $\sigma = 3,97$, $K_V = 0,255$). За три года общий пробег составил 33,7 млн км: при заданной интенсивности отказов $\lambda_A = 0,5$ отк/млн км среднее число отказов должно было быть 16,86 отк/млн км. Таким образом, результаты моделирования сходятся с теоретическими. Отказы категории B ($M = 96,8$, $\sigma = 8,7$, $K_V = 0,09$) также сходятся с теоретическим 101,8 при $\lambda_B = 3$ отк/млн км. Аналогично и по другим категориям отказов.

Увеличение потребного парка составов составило от 13 до 15 ($M = 13,48$, $\sigma = 0,646$, $K_V = 0,048$). Несущественное увеличение парка можно объяснить высокой надежностью электропоездов ВСМ. Процент нахождения составов в работе упал с 35,3 до 34,1 % ($\sigma = 1,64$, $K_V = 0,048$). КГЭ остался в допуске, но упал с 0,971 до 0,966 ($\sigma = 0,002$, $K_V = 0,002$) за счет увеличения простоя на ремонте 2,93 до 3,36 % ($\sigma = 0,19$, $K_V = 0,056$).

Очередь на ТОиР хоть и достигала 4 составов ($M = 2,68$, $\sigma = 1,36$, $K_V = 0,508$), но составила очень небольшой процент в общем бюджете времени ($M = 0,038$ %, $\sigma = 0,028$). Высокий коэффициент вариации $K_V = 0,727$ показывает случайность возникновения очереди. Очередь можно уменьшить увеличением числа канав с 6 до 7, но это может быть нецелесообразно из-за и так низкого процента занятости канав ($M = 7,53$ %, $\sigma = 0,084$, $K_V = 0,011$).

Выполнен анализ процесса образования очереди. Например, из-за совпадения двух ремонтов N возникла потребность в 10 составе (180-й час), а на 181 часе — в 11 составе. При этом были заняты только 4 ремонтных позиции. А вот на 182 часе, из-за непланового ремонта, 7 составов оказалось на ремонте и возникла потребность в еще одном составе. А к 188 часу уже два состава оказались простаивающими в ожидании работы. В 56-й день моделирования (1336-й час) на ремонт возникла очередь на ТОиР (1 состав в очереди, 6 на ремонте). Таким образом, совпадение плановых ремонтов и возникновение неплановых ремонтов приводит к росту потребного парка составов. Также на увеличение парка влияет совпадение «тяжелых» ТОиР типа IS.

На рис. 7 приведены результаты итерационного моделирования для различных интенсивностей отказов категории A $0 \leq \lambda_A \leq 5$ при отсутствии других категорий. Число

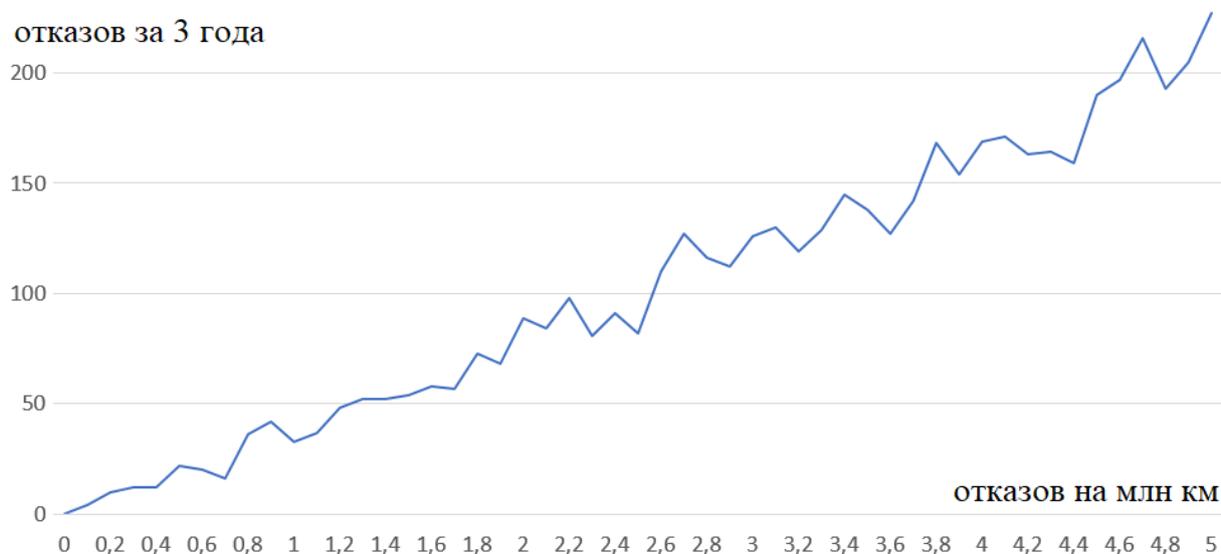


Рис. 7. Число отказов за 1095 дней при изменении их интенсивности

отказов увеличивалось нелинейно из-за использования вероятностного моделирования. Существенного влияния на параметры ТОиР рост отказов категории *A* не оказал.

Существенно влияние на результаты моделирования оказало увеличение времени оборота составов с 3 до 10 часов. КГЭ увеличивался с 0,947 до 0,975, но число потребных составов выросло с 8 до 47. Число отказов существенно увеличивалось. Например, категории *A* — с 9 до 183. Это объясняется расчетом вероятности отказа как интеграла по времени в пути.

Получен интересный результат зависимости параметров модели от увеличения полигона с 700 км до 12 тыс. км (например, за счет удлинения маршрута до Казани, Минск и дальше). Число отказов, как и в предыдущем примере, растет с 9 до 183. Но существенно вырастает процент нахождения составов в работе — с 23 до 82 %. Растет процент занятости канав с 2,7 до 35,5 %. Простой сокращается с 75 до 14 %. Таким образом, увеличение полигона эксплуатации составов положительно влияет на эффективность их использования. В качестве недостатка следует отметить падение КГЭ с 0,98 до 0,955.

Рассмотрено влияние числа пар поездов для полигона 1400 км от 7 до 30. При естественном росте потребного парка составов от 6 до 19 растет КГЭ от 0,974 до 0,968. Эффективнее используются ремонтные позиции от 2,6 до 10,0 %. Очередь начинает существенно расти после 25 пар поездов, что свидетельствует о необходимости пересмотра параметров депо при таком количестве поездов.

Существенное влияние оказывает увеличение межремонтного пробега (рис. 8) составов с 3000 до 31 500 км по ТОиР объема *L* с пропорциональным увеличением пробега до следующих ТОиР при неизменном полигоне (1400 км, 5 часов на оборот). Время в ремонте сокращается с 12,5 до 1,5 % с ростом КГЭ с 0,875 до 0,985. Однако для рассматриваемого полигона возрастает время простоя в ожидании ремонта с 52 до 66 %.

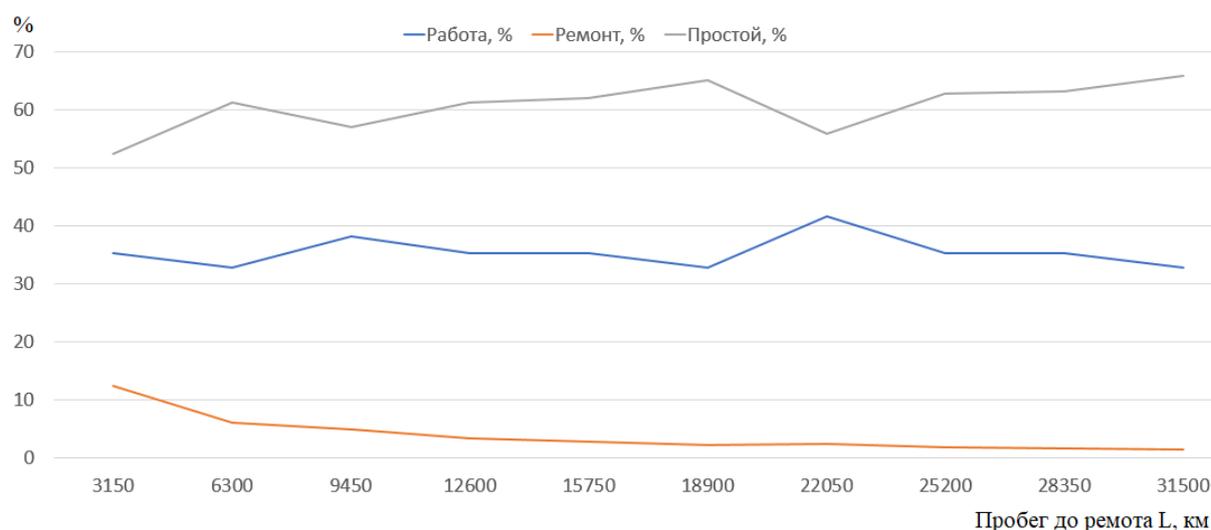


Рис. 8. Влияние увеличения межремонтного пробега

ТАБЛИЦА 2. Ожидаемые параметры ТОиР отечественных электропоездов

Цикл	Название цикла	Межремонтный пробег, км	Межремонтный интервал	Время простоя
IS100 (L)	Осмотр	12 500 ± 10 %	7 дней	1 час
IS200 (N)	Инспекция	25 000 ± 20 %	14 дней	4 часа
IS510	Обслуживание	75 000 ± 20 %	1,5 месяцев	6 часов
IS520	Обслуживание	150 000 ± 20 %	3 месяцев	9 часов
IS530	Обслуживание	300 000 ± 20 %	5 месяцев	19 часов
IS540	Обслуживание	600 000 ± 20 %	11 месяцев	28 часов
IS600	Ревизия	1 200 000 ± 20 %	21 месяц	8 дней
IS700	Ревизия	2 400 000 ± 20 %	42 месяц	12 дней

Существенное влияние межремонтного пробега на эффективность эксплуатации и ТОиР может показаться теоретическим: межремонтные пробеги задаются на этапе проектирования. Увеличение пробега возможно при использовании предиктивных методов ТОиР при использовании АСТД.

Также выполнено моделирование для параметров, предварительно определенных для отечественных электропоездов для проектируемой высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург (ВСЖМ-1), при условии среднегодового пробега 700 тыс. км (табл. 1). Число канав 8, две из которых под капитальные ремонты IS600 и IS700. Время оборота принято в 7 часов, которое вычисляется следующим образом: 40 мин — подготовка поезда, 2,5 ч — движение, 40 мин — подготовка, 2,5 ч — движение обратно, обслуживание санитарных модулей и наполнение баков ~1,5 ч (делается 1 раз в два оборота). Интенсивность отказов категории А $\lambda_A = 0,5$ отк/млн км. Чтобы пробег достиг капитальных

ТАБЛИЦА 3. Ожидаемые параметры ТОиР отечественных электропоездов

Параметр	М	СКО	K_v	min	max
Потребное число составов	23,08	0,52	0,023	22	25
В работе, %	40,5	0,91	0,022	37,3	42,4
Ожидание работы, %	56,0	1,01	0,018	53,7	59,3
Ремонт, %	3,49	0,12	0,033	3,30	3,84
КГЭ	0,965	0,001	0,001	0,961	0,967
Занятость канав, %	9,43	0,165	0,017	9,27	9,92
Очередь, составов	0,51	0,66	1,29	0	2
Очередь, %	0,009	0,023	2,57	0	0,121
Число отказов категории А	40,8	5,63	0,138	30	54
Интенсивность при моделировании, отк/млн км	0,492	0,068	0,138	0,362	0,651
Погрешность модели, %	1,6 %				

ремонт, число дней моделирования увеличено до 1850 (5 лет). Число пар поездов — 32. Результаты расчета для 100 итераций приведены в табл. 3.

Таким образом, предполагаемая технология ТОиР будет соответствовать заданному КГЭ $\geq 0,96$ при предполагаемых параметрах. Результаты многофакторного моделирования позволяют утверждать о избыточности заложенных параметров (запасе прочности).

Заключение

Для анализа процессов ТОиР и влияния надежности высокоскоростных электропоездов на качество их эксплуатации разработана математическая модель процесса их эксплуатации и ТОиР, которая реализована на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel. Получено авторское свидетельство на программу для ЭВМ [13].

Разработанная модель за заданное число дней на каждый час проверяет свободные составы на потребность постановки на один из ТОиР. При необходимости находит свободную ремонтную позицию, при ее отсутствии — ставит состав в очередь на ТОиР. Далее проверяется наличие на текущий час отправления поездов, к которым подвязываются свободные составы с минимальным пробегом, а при отсутствии число составов увеличивается: в результате определяется потребное число составов. Для составов в поездке случайным образом с использованием экспоненциального закона моделируется наступление отказа с заданной интенсивностью по всем категориям отказов. С использованием логнормального закона моделируется время задержки состава в пути и время простоя на ТОиР. Результаты моделирования выводятся в листы таблицы Excel. Предусмотрено

многоитерационное моделирование для получения статистически достоверных данных или для различных исходных данных.

Выполнено детерминированное моделирование с отладкой программы и определением наглядных параметров для вероятностного моделирования. Выбран полигон оборота составов 1400 км за 5 и 7 часов, 22 и 33 пары поездов в сутки с 6 утра до 22 часов вечера, 6 и 8 ремонтных позиций с параметрами надежности, периодичности и продолжительности ТОиР согласно техническому заданию на проектирование отечественного высокоскоростного электропоезда. В статье приведены статистические показатели для 50 итераций вероятностного моделирования за 1095 (3 года) и 1850 (5 лет) дней.

Выполнено итерационное вероятностное моделирование с изменением основных исходных данных: интенсивность отказов, размер полигона, время оборота на одном и том же полигоне, межремонтный пробег и др. Результаты приведены в статье. Также выполнено многоитерационное моделирование для предполагаемых параметров ТОиР, доказавшее их допустимость.

Повысить эффективность эксплуатации высокоскоростных составов возможно за счет включения в систему ТОиР комплексных бортовых автоматизированных систем технического диагностирования как источника информации о реальном техническом состоянии составов, наличии предотказных состояний, локализацией места отказа и прогнозированием остаточного ресурса, уменьшением интенсивности отказов до 30 %, сокращением простоя на ТОиР.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 27.102—2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2021. — 40 с.
2. ГОСТ 18322—2016. Система ТОиР техники. Термины и определения. — Стандартинформ, 2021. — 16 с.
3. Семенов А. П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования: дисс. д-ра техн. наук / А. П. Семенов. — М.: МИИТ, 2021. — 379 с.
4. Грачев В. В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов: дисс. ... д-ра техн. наук / В. В. Грачев. — СПб.: ПГУПС, 2020. — 434 с.
5. Лакин И. И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов: дисс. ... канд. техн. наук / И. И. Лакин. — М.: МИИТ, 2016. — 195 с.
6. Аболмасов А. А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания: дисс. ... канд. техн. наук / А. А. Аболмасов. — М.: МИИТ, 2017. — 180 с.

7. Мельников В. А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления: дисс. ... канд. техн. наук / В. А. Мельников. — М.: РУТ, 2021. — 176 с.
8. Липа К. В. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, В. Н. Пустовой, С. Л. Лянгасов и др. — М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. — 212 с.
9. Плескунов М. А. Теория массового обслуживания / М. А. Плескунов — Екатеринбург: Ид-во Урал. ун-та, 2022. — 264 с.
10. Уокенбах Дж. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA. Пер. с англ. / Дж. Уокенбах. — М.: ООО «И. Д. Вильямс». 2014. — 944 с.
11. Денисов Ю. А. Депо для высокоскоростных электропоездов «Сапсан» / Ю. А. Денисов, Е. Г. Янченко, Г. И. Черномаз и др. — М.: Железные дороги мира, 2009. — С. 44–49.
12. Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта. Сайт ИЦ ЖТ.
13. Лакин И. И. Модель технического обслуживания и ремонта скоростных электропоездов с использованием данных бортовых систем диагностики. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663017 от 19 июня 2023 г. / Лакин И. И. — М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности.

Дата поступления: 20.08.2023

Решение о публикации: 08.10.2023

Контактная информация:

ГАЛАХОВ Андрей Николаевич — главный конструктор по подвижному составу; andrey.galakhov@ecrt.ru

ЛАКИН Игорь Игоревич — ведущий эксперт; igor.lakin@ecrt.ru

СКВОРЦОВ Дмитрий Дмитриевич — главный эксперт; dmitry.skvortsov@ecrt.ru

High-Speed Electric Trains Maintenance and Repair Simulation Using Data from On-board Diagnostic Systems

A. N. Galakhov, I. I. Lakin, D. D. Skvortsov

JSC “Engineering Center of Railway Transport”, 5, Bolshoi bulvar, the Territory of the Skolkovo Innovation Center, Moscow, 121205, Russian Federation

For citation: Galakhov A. N., Lakin I. I., Skvortsov D. D. High-Speed Electric Trains Maintenance and Repair Simulation Using Data from On-board Diagnostic Systems. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 52-67. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-52-67

Summary

Purpose: High-speed railway lines (HSRL) are the most promising direction of railway transport development in the 21st century, increasing the mobility of the population at a distance of up to 1000 km, contributing to the development of urban conglomerations. Reliable rolling stock is necessary for the functioning of the HSRL.

The article describes the performed mathematical simulation of the operation and maintenance and repair system (MRS) of high-speed electric trains in relation to the St. Petersburg — Moscow landfill. The purpose of the simulation is to substantiate the requirements for MRS, including when using on-board automated systems for technical diagnostics. **Methods:** It is based on the principles of passenger traffic organization, technical requirements for domestic high-speed rolling stock, queue theory methods, as well as probabilistic mathematical modeling methods in MS Excel in the algorithmic language Visual Basic for Applications (VBA). The corresponding software has been developed. **Results:** A mathematical model and software have been developed, multifactor modeling has been performed, the degree of failure impact on the required fleet of high-speed electric trains has been determined. Methods of optimization of maintenance to reduce the required fleet are proposed. The requirements for the mathematical model itself are defined. A factor analysis of operation and maintenance has been performed by mathematical modeling. **Practical significance:** The guarantee of safe and reliable high-speed traffic is the creation of a modern system of maintenance and repair of rolling stock. The study of the interaction of operation and maintenance is very important in preparation for the launch of domestic high-speed traffic.

Keywords: railways, high-speed railway lines, rolling stock, maintenance and repair, mathematical modeling.

References

1. *GOST R 27.102—2021. Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob"ekta. Terminy i opredeleniya* [GOST R 27.102—2021. Reliability in technology. Reliability of the object. Terms and Definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2021, 40 p. (In Russian)
2. *GOST 18322—2016. Sistema TOiR tekhniki. Terminy i opredeleniya* [GOST 18322—2016. Equipment maintenance and repair system. Terms and Definitions]. Moscow: Standartinform Publ., 2021, 16 p. (In Russian)
3. Semenov A. P. *Model' upravleniya zhiznennym tsiklom lokomotivov s ispol'zovaniem sovremennykh metodov tekhnicheskogo diagnostirovaniya: diss. d-ra tekhn. nauk* [Model of locomotive life cycle management using modern methods of technical diagnostics: diss. Dr. Tech. Sciences]. Moscow: MIIT Publ., 2021, 379 p. (In Russian)
4. Grachev V. V. *Nauchnye osnovy primeneniya metodov intellektual'nogo analiza dannykh dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific principles of using data mining methods for monitoring the technical condition of locomotives: dissertation. ... Dr. Tech. Sciences]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2020, 434 p. (In Russian)
5. Lakin I. I. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po dannym bortovykh apparatno-programmnykh kompleksov: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Monitoring the technical condition of locomotives according to data from on-board hardware and software systems: diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow: MIIT Publ., 2016, 195 p. (In Russian)
6. Abolmasov A. A. *Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tyagovogo podvizhnogo sostava v usloviyakh servisnogo obsluzhivaniya: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Management of the technical condition of traction rolling stock under service conditions: diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow: MIIT Publ., 2017, 180 p. (In Russian)
7. Mel'nikov V. A. *Sovershenstvovanie metodov diagnostirovaniya teplovozov 2TE116U s primeneniem dannykh bortovykh sistem upravleniya: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving methods

for diagnosing diesel locomotives 2TE116U using data from on-board control systems: diss. ...cand. tech. Sciences]. Moscow: RUT Publ., 2021, 176 p. (In Russian)

8. Lipa K. V., Pustovoy V. N., Lyangasov S. L. et al. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya i rezhimov ekspluatatsii lokomotivov. Teoriya i praktika* [Monitoring the technical condition and operating modes of locomotives. Theory and practice]. Moscow: OOO “Lokomotivnye Tekhnologii” Publ., 2015, 212 p. (In Russian)

9. Pleskunov M. A. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queuing theory]. Ekaterinburg: Ural. un-t Publ., 2022, 264 p. (In Russian)

10. Uokenbakh Dzh. *Excel 2010: professional'noe programmirovaniye na VBA. Per. s angl.* [Excel 2010: professional programming in VBA. Translation from English]. Moscow: OOO “I. D. Vil'yams” Publ., 2014, 944 p. (In Russian)

11. Denisov Yu. A., Yanchenko E. G., Chernomaz G. I. et al. *Depo dlya vysokoskorostnykh elektropoezdov “Sapsan”* [Depot for high-speed electric trains “Sapsan”]. Moscow: Zheleznye dorogi mira Publ., 2009, pp. 44–49. (In Russian)

12. *Inzhiniringovyy tsentr zheleznodorozhnogo transporta. Sayt ITs ZhT* [Engineering center for railway transport. IC ZhT website]. (In Russian)

13. Lakin I. I. *Model' tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta skorostnykh elektropoezdov s ispol'zovaniem dannykh bortovykh sistem diagnostiki. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2023663017 ot 19 iyunya 2023 g.* [Model of maintenance and repair of high-speed electric trains using data from on-board diagnostic systems. Certificate of state registration of a computer program № 2023663017 dated June 19, 2023]. Moscow: Federal'naya sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti Publ. (In Russian)

Received: August 20, 2023

Accepted: October 08, 2023

Author's information:

Andrey N. GALAKHOV — Chief Rolling Stock Designer; andrey.galakhov@ecrt.ru

Igor I. LAKIN — Leading Expert; igor.lakin@ecrt.ru

Dmitriy D. SKVORTSOV — Leading Expert; dmitry.skvortsov@ecrt.ru