

УДК 629.47

Вероятностный анализ отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта с использованием технологии цифрового двойника

А. А. Иванов¹, А. С. Шинкарук², И. А. Вишняков¹

¹ Российский университет транспорта, Россия, 127055, Москва, Новосущевская ул., 22, стр. 1

² Акционерное общество «Федеральная пассажирская компания», Россия, 107078, Москва, ул. Маши Порываевой, 34.

Для цитирования: Иванов А. А., Шинкарук А. С., Вишняков И. А. Вероятностный анализ отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта с использованием технологии цифрового двойника // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 1. С. 27–40. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-27-40

Аннотация

Цель: одно из основных направлений цифровой трансформации экономики — внедрение технологий, основанных на применении цифровых двойников объектов. В статье рассмотрен вариант использования этой технологии для анализа периода нахождения пассажирского вагона в неиспользуемом парке для проведения его планового ремонта, продолжительность которого влияет на общую величину непроизводительного простоя подвижного состава и эффективность работы пассажирского комплекса. Предложено использовать самонастраивающиеся технологии и математические модели временных составляющих процесса, связанного с отвлечением от перевозок пассажирского вагона для проведения планового ремонта крупного объема (капитального и деповского). Рассмотрены поэлементные периоды отвлечения от эксплуатационного процесса — от момента перевода пассажирского вагона в нерабочий парк (в информационной системе) с отцепкой от состава до возвращения его в поезд после выполненного планового ремонта. Определение законов распределения для каждой составляющей процесса позволяет обосновать планируемую загрузку ремонтных мощностей предприятий, объем наличного эксплуатационного парка вагонов с последующей привязкой к суточному плану-графику работы станции формирования поездов, а также планировать мощность вагоноремонтной базы для выполнения деповского и капитального ремонта. В работе приведен пример использования цифрового двойника процесса отвлечения пассажирского вагона в неиспользуемом (нерабочем) парке для проведения планового ремонта. В статье рассматриваются использование самонастраивающейся технологии и математические модели временных составляющих процесса, связанного с отвлечением от перевозок пассажирского вагона для проведения планового ремонта крупного объема. **Метод:** вероятностно-статистический анализ. **Результаты:** предложенный метод дает возможность в режиме реального времени планировать и корректировать эксплуатационные показатели эффективности использования вагонного парка по мере накопления статистической информации с учетом возможных возникновений форс-мажорных обстоятельств, а также моделировать случайное отклонение от нормируемых продолжительностей (при наличии последних). **Практическая значимость:** результаты работы имеют практическое значение для структурных предприятий вагоноремонтного комплекса, а также для собственников, перевозчиков и операторов нетягового подвижного состава.

Ключевые слова: пассажирский вагон, плановый ремонт крупного объема, организация процесса отвлечения вагона для планового ремонта, случайная величина, вероятностная модель, технология цифрового двойника

Введение

В коммерческих компаниях и на промышленных предприятиях для повышения эффективности совершенствуют производственные процессы и в приоритетном порядке внедряют цифровые технологии четвертой промышленной революции [1, 2]. Для перспективной и важной цифровой трансформации используют цифровые двойники объектов, позволяющие моделировать процессы в режиме реального времени [3].

В машиностроении широко применяют технологии цифрового двойника, позволяющие при создании сложных технических объектов, таких как автомобиль, самолет, реактивные турбины и др., моделировать параметры конструкций и нагрузки, закладывать различные технические, прочностные характеристики, свойства материалов и т. п. Применение цифровых двойников в автомобилестроении позволило на 30% снизить расходы при проектировании новых моделей, исключить дорогие краш-тесты и испытания физических прототипов автомобилей. В настоящее время их выполняют с помощью математических моделей и специализированных программных продуктов. Возможности цифровизации широко используют в промышленном дизайне, для компоновки, интерьерного и экстерьерного проектов объектов. Кроме того, технологии цифрового двойника сокращают в 2 раза (с 30 до 16 месяцев) период от разработки проекта до момента начала серийного производства новых моделей автомобилей [4].

При проектировании кузова и экипажной части железнодорожного тягового и нетягового подвижного состава обязательно моделируют напряженно-деформированное состояние конструкций, исследуют влияние динамических эксплуатационных нагрузок с применением цифровых моделей (цифровых

двойников) узлов и элементов. Возможности специальных программных комплексов при обосновании работоспособности конструкций, их долговечности и безотказности позволяют существенно сократить срок разработки новых типов вагонов и локомотивов [5]. Также на железнодорожном транспорте интенсивно внедряют цифровые технологии для управления процессом движения поездов в режиме реального времени, разработки новых графических ниток, а также диспетчеризации при нештатных ситуациях и нарушении графика. Технологии цифрового двойника широко применяют для организации и планирования производственных процессов на предприятиях по ремонту тягового и моторвагонного подвижного состава [6].

Элементы концепции технологии цифрового двойника непосредственно зависят от целей исследований и решаемых задач, а объектами могут быть как физические прототипы, так и процессы.

Линейным предприятиям пассажирского вагонного хозяйства цифровые технологии позволят усовершенствовать производственные процессы, связанные с эксплуатацией инвентарного вагонного парка [1, 2]. В настоящее время в АО «ФПК» функционирует автоматизированная информационная система АСУ ПВ (автоматизированная система управления пассажирским вагоном). В системе по каждому пассажирскому вагону ведут учет эксплуатационных характеристик, текущих параметров колесных пар и других элементов, маршрутов курсирования, суммарных пробегов, неплановых ремонтов, контролируют сроки плановых ремонтов и технических обслуживаний.

Несмотря на увеличение межремонтных периодов пассажирских вагонов, растет продолжительность их отвлечения от перевозочного процесса для планового ремонта

крупного объема. С одной стороны, проводят укрупнение пассажирских вагонных депо, закрывают малоэффективные предприятия, чтобы повысить качество ремонта обновленного вагонного парка. При одновременном увеличении межремонтных периодов это приводит к сокращению ремонтных предприятий по сети. С другой стороны, возникают дополнительные непроизводительные простои вагонов из-за выполнения устаревших нормативов и новых дополнительных операций, например пересылка на вагоноремонтное предприятие. Ранее пересылка была необходима при капитальном ремонте пассажирских вагонов на вагоноремонтных заводах. Доля таких операций составляла менее 10%. В настоящее время, по информации АСУ ПВ, например, для вагонов моделей 61-4440 фактическое время, на которое вагон изымают из перевозочного процесса для ремонта в условиях вагонного депо (продолжительность отвлечения для проведения депоовского ремонта), может достигать 210 суток. При этом нормируемая продолжительность непосредственно ремонта и его ожидания составляет 6 суток. Таким образом, можно отметить, что существуют проблемы в организации депоовских и капитальных ремонтов. Действующие правила организации ремонта снижают производительность вагона. При этом для заданного объема перевозок необходим больший вагонный парк из-за его нерационального использования. Новые цифровые технологии позволят расширить возможности существующей системы АСУ ПВ и интегрировать в нее новые и перспективные инструменты, такие как учет местонахождения объекта (позиционирование), взаимодействие с мобильными устройствами, интернет вещей и др. Рассмотрим возможности технологии цифрового двойника, чтобы проанализировать

и смоделировать процесс отвлечения пассажирского вагона от непосредственного использования по назначению (то есть нахождение в нерабочем парке) для планового ремонта крупного объема.

Собираемая статистическая информация АСУ ПВ позволяет анализировать продолжительность различных состояний пассажирского вагона в процессе эксплуатации. Для планового ремонта вагон переводят в нерабочий парк, отцепляют от прибывшего в пункт формирования состава пассажирского поезда. Постановку отремонтированного вагона в состав можно считать окончанием процесса отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта. Этот период включает как непосредственный технологический процесс ремонта, продолжительность которого нормируют для каждой модели вагона по объему и средней трудоемкости выполняемых работ, так и подготовительно-заключительные операции. Разработанная блок-схема анализа процесса отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта показана на рис. 1.

При необходимости проведения планового ремонта (блок 2) пассажирский вагон переводят в нерабочий парк, исключают из состава поезда и переставляют на пути резерва станции формирования, выполняют подготовительные операции (работы N_1): снятие мягкого и жесткого инвентаря, влажную уборку, а также охрану. Продолжительность этого периода обозначим ΔT_1 .

Если вагоноремонтное предприятие и пункт формирования, на котором находится объект ремонта, расположены на разных станциях, то необходимо транспортировать вагон на станцию ремонтного предприятия (блок 4) и организовать его сопровождение.

Вагон ожидает прицепки в состав пассажирского или грузового поезда и следует на

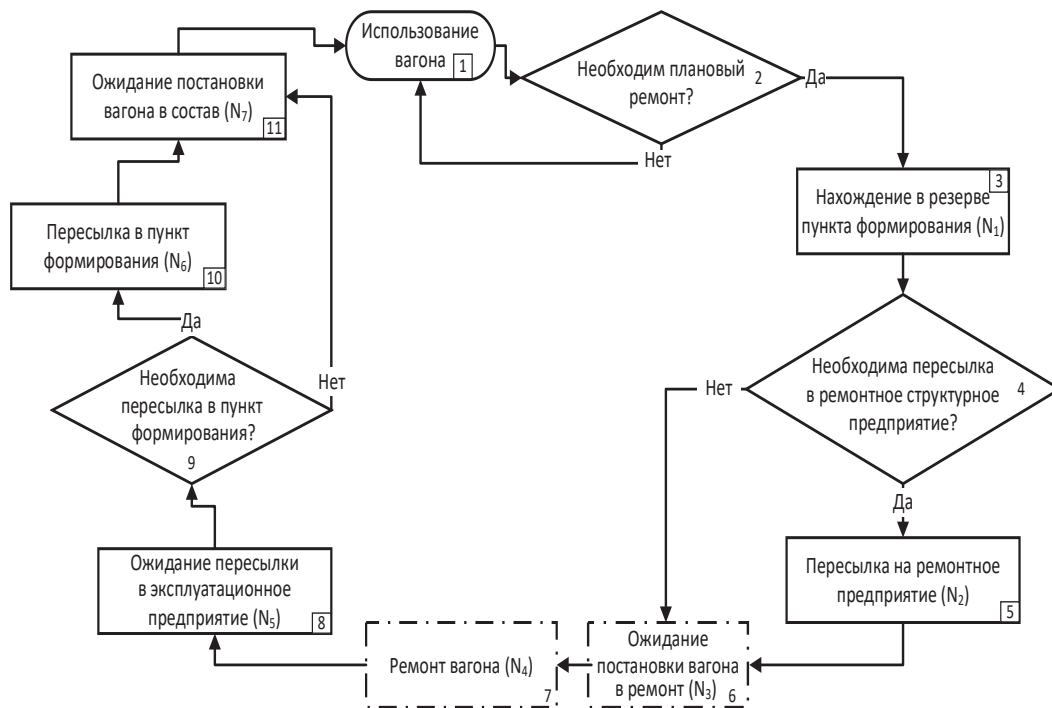


Рис. 1. Процесс анализа отвлечения вагона для проведения ремонта крупного объема

ремонтное предприятие N_2 (блок 5). Продолжительность периода обозначим ΔT_2 .

Если объект ремонта и ремонтное предприятие находятся в границах одной станции, то вагон передают на подъездные пути депо N_3 (блок 6). Здесь вагон ожидает, когда его поставят на ремонтные позиции вагоносборочного участка. Длительность ожидания ремонта обозначим ΔT_3 .

Непосредственно регламентные диагностические и ремонтные работы N_4 (блок 7) начинают, когда вагон поставлен на ремонтные позиции. Продолжительность ремонта обозначим ΔT_4 .

После окончания ремонта вагон передают на подъездные пути предприятия N_5 (блок 8), где он ожидает перестановки на стационарные пути либо пункта формирования поездов, либо станции. Здесь принимают отремонтированный вагон и организуют охрану. Продолжительность периода обозначим ΔT_5 .

Если пункт формирования и вагоноремонтное предприятие, на котором находится отремонтированный вагон, расположены на разных станциях (блок 9), то необходимо транспортировать вагон и организовать сопровождение.

Вагон ожидает прицепки в состав пассажирского или грузового поезда и следует в пункт формирования N_6 (блок 10). Продолжительность периода обозначим ΔT_6 .

Если транспортировка завершена или вагон находится на путях станции формирования поездов, то его принимает специальная комиссия эксплуатирующей организации. Одновременно вагон готовят к перевозкам, оснащают съемным мягким и жестким инвентарем N_7 (блок 11) и переставляют на резервные пути станции формирования. Здесь вагон ожидает постановки в состав поезда. Суммарную продолжительность периода обозначим ΔT_7 .

Периоды ΔT_3 и ΔT_4 регламентированы в нормативно-технической документации для каждо-

го вида планового ремонта по каждой модели вагона [5]. Остальные периоды не нормированы, хотя их величина может превышать продолжительность самого ремонта. Это существенно снижает эффективность работы и коэффициент готовности вагона, проблемы оценки которого системно рассмотрены в работе [8] на примере высокоскоростных поездов.

Кроме того, простой ΔT_7 возрастает, когда отремонтированный вагон не востребован в перевозочном процессе и простаивает на путях технического перестоя станции формирования, находясь в резерве. Это происходит, поскольку для сохранения схемы состава поезда направляемый в ремонт вагон всегда заменяют аналогичным из резерва. Поэтому отремонтированный вагон попадает в резерв пункта формирования. Вагон ожидает постановки в поезд, пока не потребуются замена неисправного вагона такого же типа или увеличение длины состава. Наибольшие простои в резерве — у специализированных пассажирских вагонов: вагонов-буфетов, вагонов-радиостанций, вагонов с купе для инвалидов, вагонов-ресторанов, спальных вагонов, вагонов люкс и др. (то есть вагонов, предоставляющих специальные услуги).

Простои в резерве возникают при любой отцепке вагона от состава поезда: для проведения планового ремонта, ТО-3 (единой технической ревизии), текущего отцепочного ремонта или специальных санитарных обработок.

Приведенные на рис. 1 блоки могут быть в дальнейшем детализированы и разбиты на подпроцессы.

Эксплуатирующая компания должна, с одной стороны, на период отвлечения вагона обеспечить его замену в составе поезда аналогичной моделью, с другой — обеспечить равномерную загрузку вагоноремонтного предприятия и ритмичную поставку объектов

ремонта. При этом могут возникать непроизводственные перепростои вагонов парка, связанные с несвоевременным исключением вагона из перевозочного процесса из-за отсутствия аналогичной модели в резерве или с ожиданием постановки вагона на позиции ремонтного предприятия.

Часто в эксплуатации при организации технологических процессов считают детерминированной продолжительность операций, часть которых может быть нормированной. При этом продолжительность операции считают постоянной с нулевым рассеиванием либо равной математическому ожиданию случайной величины длительности процесса без учета характеристик рассеивания. Такой подход наименее эффективен, поскольку без учета характеристик рассеивания могут возникать авральные режимы работы линейных предприятий.

В настоящее время вычислительные возможности и цифровые технологии позволяют получать рассмотренные выше составляющие процесса отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта в виде случайных величин.

Чтобы определить случайную величину, необходимо получить закон распределения — вероятностную модель продолжительности рассматриваемого процесса. Для описания работы предприятий вагонного комплекса наиболее часто применяют вероятностные модели экспоненциального (показательного), нормального и логарифмически нормального (логнормального) законов распределений [9].

Плотность экспоненциального закона распределения случайной величины:

$$f(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t}, \quad (1)$$

где λ_i — параметр закона распределения времени выполнения i -й операции, точечную оценку которого определяют по статистическим данным. Параметр связан с величиной

математического ожидания M_i длительности i -й операции: $\lambda_i = 1/M_i$.

Плотность нормального закона распределения имеет вид:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M_i)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (2)$$

где M_i — математическое ожидание продолжительности выполнения i -й операции; σ_i — среднеквадратическое отклонение этой величины.

Точечные оценки этих показателей получают на основе статистической информации. Закон имеет симметричное распределение вероятностей относительно математического ожидания случайной величины. Эта особенность не позволяет использовать его при определении случайных величин ΔT_i .

Плотность логарифмически нормального закона распределения случайной величины имеет вид:

$$f(t) = \frac{1}{t \cdot \sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - M_i)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (3)$$

здесь M_i — математическое ожидание логарифма продолжительности i -й операции; σ_i — среднеквадратическое отклонение этой величины. Их оценки также можно получить по статистическим данным:

$$\begin{aligned} M_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln \Delta T_{ij}, \\ \sigma_i &= \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\ln \Delta T_{ij} - M_i)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где n — количество проведенных испытаний; ΔT_{ij} — значение, которое приняла случайная величина продолжительности i -й операции в j -м наблюдении за процессом ремонта вагона.

Закон применяют, когда логарифм случайной величины имеет нормальное распре-

деление. Эта модель, в отличие от нормального распределения, несимметрична. Поэтому для моделирования составляющих процесса отвлечения ΔT_i по технологии цифрового двойника использован логарифмически нормальный закон распределения.

Существующая информационная система АСУ ПВ позволяет в соответствии со стандартным планом испытаний на надежность типа $[N U N]$ организовать эксперимент для пассажирских вагонов рассматриваемой модели и получить точечные оценки параметров законов распределения заданного вида.

Проверка однородности выборок с помощью правила трех сигм показала, что результаты экспериментов неоднородны, то есть имеют элементы с чужими законами распределения. Пример результата анализа выборок на однородность и приведение выборки к однородной приведены в табл. 1.

Полученные точечные оценки параметров логарифмически нормальных законов распределения всех семи составляющих ΔT_i приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Качество полученных точечных оценок параметров законов распределений проверено по критерию Пирсона [9]. Результат проверки, расчетные и табличные значения критерия Пирсона приведены в табл. 2. В результате получены средние значения для всех ΔT_i и характеристики рассеивания. Как видно из табл. 2, средние значения ΔT_3 и ΔT_4 больше нормативных значений. Это свидетельствует, что необходимо либо корректировать нормативы простоев, либо изменить технологические процессы на вагоноремонтных предприятиях на основе их детального анализа.

Предлагаемая технология цифрового двойника на основе разработанной модели процесса отвлечения (рис. 1) и технологии формирования вероятностных моделей

ТАБЛИЦА 1. Результаты приведения выборки к однородной

№ п/п	Состояние, N_i	Для исходной выборки							Результат проверки однородности выборки	Для выборки, приведенной к однородной			число отброшенных элементов
		число элементов N	мин. ΔT_i , сут.	макс. ΔT_i , сут.	$M\Delta T_i$, сут.	s_i , сут.	$M\Delta T_i - 3s_i$, сут.	$M\Delta T_i + 3s_i$, сут.		число элементов	мин. ΔT_i , сут.	макс. ΔT_i , сут.	
1	N_1	385	1	636	40,8	81,9	-205	286	неоднородн.	221	1	10	164
2	N_2^{**}	163	1	30	4,6	5,3	-11,2	20,5	неоднородн.	152	1	11	11
3	N_3^{**}	163	1	320	23,8	41,8	-102	149,1	неоднородн.	153	1	90	10
4	N_4^*	259	3	70	13,8	11,2	-19,7	47,2	неоднородн.	255	3	45	4
5	N_5^{**}	163	1	115	3,9	12,4	-33,2	41,1	неоднородн.	123	1	55	40
6	N_6^{**}	163	1	34	6,2	6,1	-12,0	24,4	неоднородн.	121	1	14	42
7	N_7	385	1	756	27,8	62,4	-160	214	неоднородн.	377	1	211	8

* для деповского ремонта;

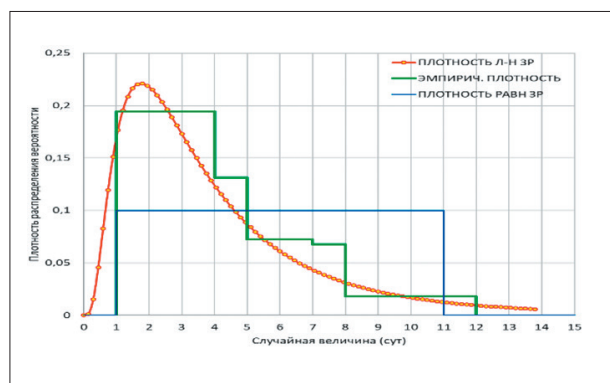
** для вагонов, требующих передислокации.

ТАБЛИЦА 2. Результаты формирования вероятностных моделей продолжительностей нахождения вагона в N_i состоянии

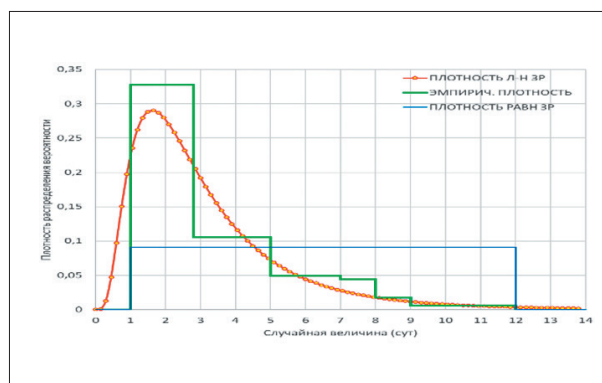
№ п/п	Состояние, N_i	Вид закона распределения	Параметры		Статистика Пирсона	Число степеней свободы, n	$[c^2](\alpha = 0,05, n)$	Согласованность, ДА/НЕТ	Математич. ожидание периода, сут.	Среднее кв. отклон. периода, сут.
			M_i , ln(сут.)	s_i , ln(сут.)						
1	N_1	лог. норм.	1,15	0,766	8,291	6	11,07	ДА	3,16	2,14
2	N_2^{**}	лог. норм.	0,94	0,674	7,130	7	12,59	ДА	2,56	1,96
3	N_3^{**}	лог. норм.	2,06	1,177	17,690	11	18,31	ДА	7,85	3,25
4	N_4^*	лог. норм.	2,38	0,659	13,971	8	14,07	ДА	10,8	1,93
5	N_5^{**}	лог. норм.	1,08	0,391	10,880	6	11,07	ДА	2,95	1,02
6	N_6^{**}	лог. норм.	1,33	0,722	18,200	14	22,36	ДА	3,78	2,06
7	N_7	лог. норм.	2,13	1,348	8,830	7	12,29	ДА	8,42	3,85

* для деповского ремонта;

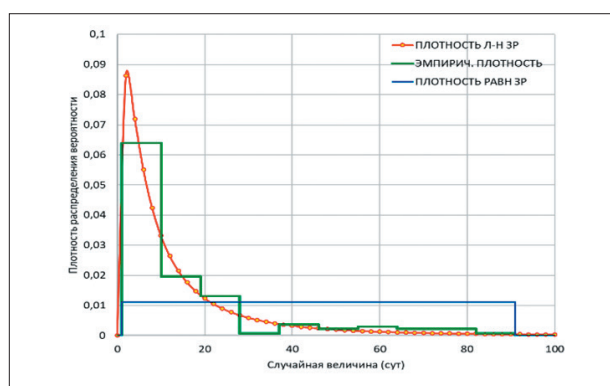
** для вагонов, требующих передислокации.



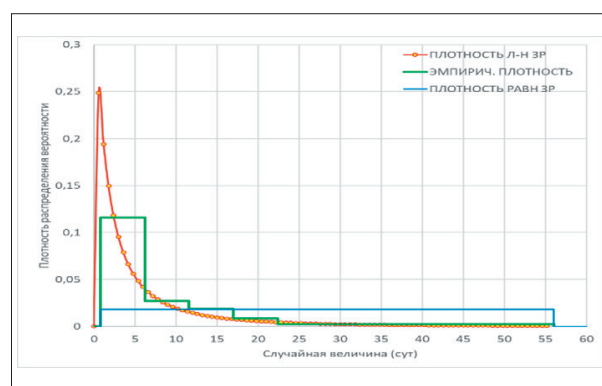
а) в резерве пункта формирования ΔT_1



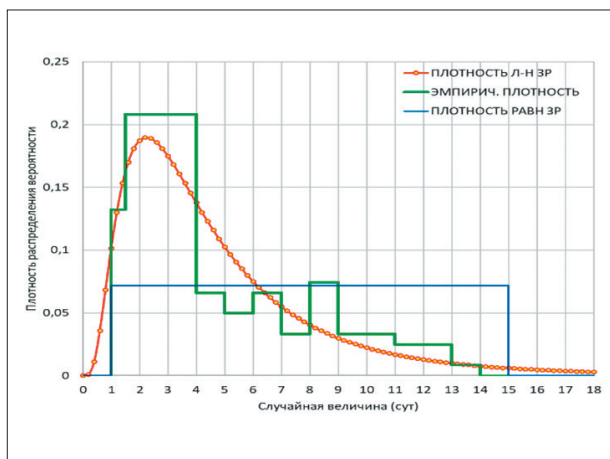
б) пересылка на рем. предприятие ΔT_2



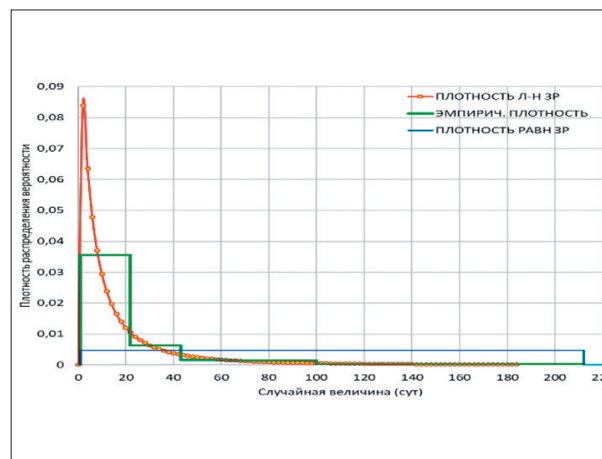
в) ожидание постановки в ремонт ΔT_3



г) ожидание пересылки в пункт формирования ΔT_5



д) пересылка в пункт формирования ΔT_6



е) ожидание прицепки в состав ΔT_7

Рис. 2. Эмпирические и теоретические законы распределения ΔT_i отвлечений вагона от перевозочного процесса для проведения планового ремонта: эмпирические (выборочные) функции плотности распределения — в виде ступенчатых графиков; вероятностные модели, описывающие случайные величины, — в виде гладких кривых с параметрами, приведенными в табл. 2

случайных величин ΔT_i позволяет алгоритмизировать и формализовать процесс прогнозирования простоя вагона в нерабочем парке (рис. 3).

На основе информации АСУ ПВ формируют перечень отвлечений (блок 2). Для вагона формируют маршрут (по рис. 1) — планируемый процесс отвлечения на ремонт (блок 3). В онлайн-режиме формируют цифрового двойника (блок 5), чтобы смоделировать общий период отвлечения и его составляющие. Для этого необходима информация системы АСУ ПВ (блок 6). Производят моделирование (блок 7) общего периода отвлечения и его составляющих.

Если значения, полученные в блоке 7, соответствуют заявленной ожидаемой или нормированной величине, то организывают и проводят ремонт крупного объема (блок 10). В противном случае система корректирует период отвлечения вагона и нахождения в нерабочем парке (блок 9).

Чтобы применить приведенную технологию, нужно смоделировать случайные величины ΔT_i при помощи метода статистических испытаний.

Суть метода моделирования случайных величин, применяемых для цифрового двойника, заключена в построении искусственного случайного процесса, аналогичного реальному,

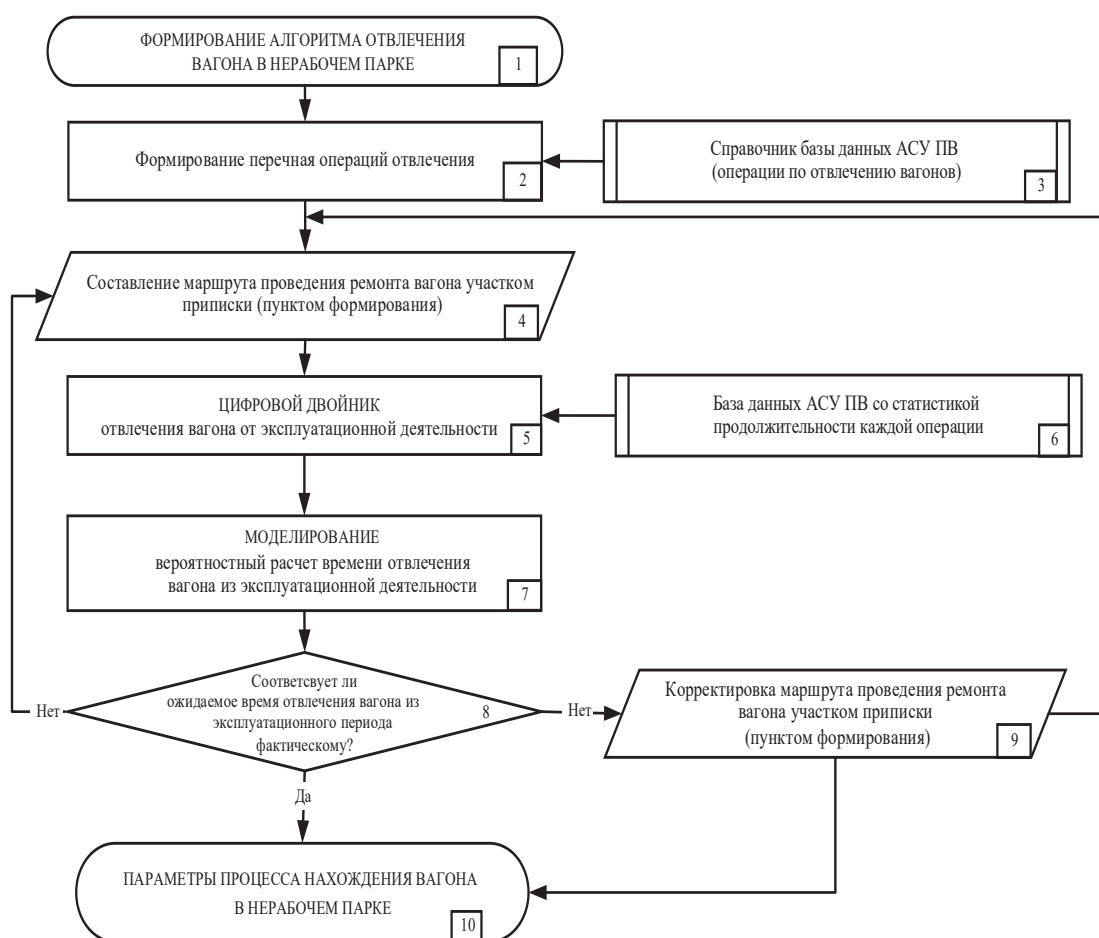


Рис. 3. Процесс построения прогноза отвлечения вагона для проведения планового ремонта

с применением генератора псевдослучайных чисел. Сама операция моделирования (или розыгрыша) случайных величин состоит в формировании ряда значений, имеющих заданный закон распределения, с помощью стандартных средств генерации равномерно распределенных случайных чисел.

Для этого формируют L значений в серии независимых вычислительных опытов и получают ряд значений x_j , $j = \overline{1, L}$ моделируемой случайной величины, которую обозначим x . Требуется получить значение z случайной величины, закон распределения которой совпадает с распределением величины x с известными параметрами: математическим ожиданием (обозначим его $Mx = a$) и дисперсией ($Dx = b$), оценки которых, как описано ранее, можно получить на основе информации АСУ ПВ.

Согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, распределение величины суммы x_j

$$(j = \overline{1, L}): \rho_L = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_L \quad (5)$$

является приблизительно нормальным со средним значением $m = La$ и дисперсией $s^2 = Lb^2$. Согласно правилу трех сигм, каковы бы ни были m и s :

$$P\{\mu - 3\sigma < \rho_L < \mu + 3\sigma\} = 0,9973, \quad (6)$$

из которого получают соотношение:

$$P\left\{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L x_j - a < \frac{3b}{\sqrt{L}}\right\} \approx 0,9973. \quad (7)$$

На этом выражении основан метод статистических испытаний, а также оценка погрешности этого метода [9].

Чтобы провести статистические испытания, используют известные способы генерации случайных чисел z , которые основаны на многократном повторении процедуры формирования ограниченного числа L значений x_j , имеющих заданный (известный) закон распределения.

При достаточно большом числе L по закону больших чисел частота событий в серии независимых опытов стремится к вероятности этого события:

$$\lim_{L \rightarrow \infty} P^* \{X_k \leq x_j < X_{k+1}\} = P\{X_k \leq x_j < X_{k+1}\}, \quad (8)$$

где событие $\{X_k \leq x_j < X_{k+1}\}$ состоит в том, что разыгранное значение x_j окажется в интервале X_k, X_{k+1} ; $P^*\{\cdot\}$ — частота этого события $\{\cdot\}$:

$$P^* \{X_k \leq x_j < X_{k+1}\} = \frac{1}{L} \cdot N_{\{X_k \leq x_j < X_{k+1}\}}, \quad (9)$$

где $N\{\dots\}$ — количество попаданий моделируемой случайной величины x_j на интервал $\{\cdot\}$.

Среднее значение x_j и есть моделируемая случайная величина z :

$$\bar{x} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L x_j \approx z. \quad (10)$$

Величину z моделируют по каждому из семи рассматриваемых состояний отвлечения пассажирского вагона для проведения планового ремонта с известным распределением, точечные оценки параметров которого получены на основе информации АСУ ПВ.

Технология формирования ряда значений x_j ($j = \overline{1, L}$) зависит от вида закона распределения случайной величины.

При гипотезе, что закон распределения случайной величины продолжительности i -го состояния экспоненциальный (1):

$$x_j = -\frac{1}{\lambda_i} \ln P_j, \quad (11)$$

где λ_i — точечная оценка параметра экспоненциального закона распределения случайной величины продолжительности i -го состояния;

P_j — разыгрываемая случайная величина с равномерным распределением в интервале (0;1). Она соответствует уровню a для a -квантиля генерируемой случайной величины x_j .

При гипотезе, что закон распределения нормальный (2):

$$x_j = M_i + \sigma_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{12} P_j - 6 \right), \quad (12)$$

где M_i и s_i — точечные оценки параметров нормального закона распределения случайной величины продолжительности i -го состояния (математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение соответственно).

При гипотезе, что закон распределения случайной величины продолжительности i -го состояния логарифмически нормальный (3), генерацию выполняют с помощью выражения 12. При этом M_i и s_i — точечные оценки параметров логарифмически нормального закона распределения случайной величины продолжительности i -го состояния. Получаемые опытные значения соответствуют натуральному логарифму случайной величины, то есть $\ln(x_i)$. Для перехода к единицам времени используют уравнение:

$$x_i = e^{\ln x_i}. \quad (13)$$

В результате моделирования можно получить ряд значений ΔT_i , а интересующий нас в конечном счете общий период отвлечения пассажирского вагона, то есть нахождение в нерабочем парке и простой в резерве:

$$T = \sum_{i=1}^7 \Delta T_i. \quad (14)$$

В рассмотренном примере был применен логарифмически нормальный закон распределения, однако при большей степени детализации процесса или моделировании отклонений

от нормированного значения можно использовать и другие модели.

Собираемая статистическая информация об использовании пассажирского вагона позволяет создавать вероятностные модели продолжительности нахождения его в различных состояниях, моделировать процесс простоя в ремонте, прогнозировать суммарную продолжительность периода отвлечения для проведения ремонта крупного объема.

Часть случайных величин можно считать управляемыми (субъективными), другие — неуправляемыми (объективными). Желательно максимально снизить рассеивание случайных величин, составляющих непроизводительный простой вагона, чтобы процессы были более определены. Применение предложенной технологии цифрового двойника отвлечения пассажирского вагона для планового ремонта позволит вырабатывать оптимальные решения по устранению несоответствий и снижению материальных и временных потерь.

Таким образом, использование технологий цифрового двойника, основанных на решении задач вероятностно-статистического моделирования процессов эксплуатации, в том числе по предлагаемому алгоритму [10], станет основой разработки киберфизических моделей пассажирских вагонов.

Приведенная технология цифрового двойника процесса позволяет прогнозировать в режиме реального времени отвлечение пассажирского вагона для проведения ремонта крупного объема.

Предлагаемый алгоритм анализа составляющих этого процесса, методика получения законов распределения случайных величин и их моделирование дают возможность в режиме реального времени планировать и корректировать эксплуатационные показатели эффективности вагонного парка по мере накопления статистической

информации, учитывать возможность форс-мажорных обстоятельств, моделировать случайное отклонение от нормируемых продолжительностей (при наличии последних).

Кроме того, внедрение предлагаемой технологии цифрового двойника позволяет выявить закономерности в процессах отвлечения, нарушения в эксплуатации и при сборе информации о простоях пассажирских вагонов в нерабочем парке для проведения ремонта крупного объема, а также помочь обосновать целесообразность пересмотра эксплуатационной нормативной документации пассажирской компании и существующих регламентированных продолжительностей работ [7].

Список источников

1. Влияние обострения глобальных вызовов на стратегию цифровой трансформации наукоемких производств / Т.Н. Шушунова [и др.] // Транспортное дело России. 2022. № 1. С. 131–133.

2. Устич П.А., Иванов А.А., Мажидов Ф.А. Применение информационных технологий в системе технического обслуживания и ремонта вагонов // Бюллетень транспортной информации. 2016. № 9 (255). С. 13–21.

3. Столяров А.Д., Файзуллина А.М., Абрамов В.И. Цифровая трансформация логистики предприятия с использованием цифровых двойников // Beneficium. 2024. № 2 (51). С. 23–31.

4. Экономика организации (предприятия): учеб. пособие для студентов вуза, обучающихся по направлениям подготовки 38.03.01 Экономика, 38.05.01 Экономическая безопасность / Т.К. Руткаускас [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2018. 260 с.

5. Ключин А.В. Цифровой двойник модели вагона. Основы концепции, подходы к реализации

и перспективы // Актуальные вопросы эксплуатации подвижного состава в современных условиях: материалы Международной студенческой научно-практической конференции (Нижний Новгород, 21 апреля 2021 года). Н. Новгород, 2022. С. 70–74.

6. Лакин И.К., Семенов А.П. Использование технологии «Цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 3 (63). С. 89–98.

7. Об установлении норм простоя пассажирских вагонов при техническом обслуживании, деповском и капитальном ремонте: указание МПС России от 23.12.1997 № В-1465у.

8. Плохих И.В. Оценка и анализ показателей готовности высокоскоростного поезда Velaro RUS («Сапсан») с учетом опыта России и Германии: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 217 с.

9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 4-е изд., стереотип. М.: Наука, 1969. 576 с.

10. Программа оценки эффективности использования пассажирских вагонов на основе мониторинга и статистической обработки данных эксплуатации: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688607 Российская Федерация. № 2024686940 / Шинкарук А.С., Беспалько С.В., Иванов А.А.; заявл. 06.11.2024; опублик. 28.11.2024.

Дата поступления: 28.10.2025

Решение о публикации: 19.01.2026

Контактная информация:

ИВАНОВ Александр Анатольевич — канд. техн. наук, доцент; wwx720@mail.ru

ШИНКАРУК Андрей Сергеевич — канд. техн. наук; Shinkarukas@mail.ru

ВИШНЯКОВ Иван Алексеевич — аспирант РУТ; Dalisan5555@gmail.com

A probability-based analysis of passenger car removal from operation for scheduled maintenance using digital twin modelling

A. A. Ivanov¹, A. S. Shinkaruk¹, I. A. Vishniakov²

¹Russian University of Transport, bldg. 1, 22 Novosuchevskaya str., Moscow, 127055, Russia

²Federal Passenger Company, Joint Stock Company, Moscow, 34 Masha Poryvayeva st., 107078, Russia

For citation: *Ivanov A. A., Shinkaruk A. S., Vishnyakova I. A.* A probability-based analysis of passenger car removal from operation for scheduled maintenance using digital twin modelling // Proceedings of Petersburg State Transport University. 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 27–40. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-27-40. (In Russian)

Abstract

Objective: one of the key areas of the economy's digital transformation is the deployment of technologies built around digital twins. Within the context, the present study explores an application of this technology to analyze the time a passenger railcar remains in an out-of-service fleet for scheduled maintenance. The duration of this period affects the total amount of unproductive rolling stock downtime and, consequently, the operational efficiency of the passenger service segment. The use of adaptive, self-configuring technologies together with mathematical representations of the time components that shape the process of withdrawing a passenger railcar from service to perform large-scale scheduled maintenance, including overhauls and depot-level repairs. This makes it possible to examine the repair-related interruption not as a single event, but as a sequence of interrelated stages. The paper considers the full period of removal from operational service. It starts when a passenger railcar is officially recorded in the information system as transferred to the inactive fleet and physically uncoupled from the train. It ends when, after completion of the scheduled repair, the railcar is returned to service and attached to the train. An additional task of the research is to establish the probability-based distribution patterns that characterize each component of this process. Identifying these regularities creates a basis for more grounded decisions concerning the planned use of repair resources at the enterprise. It also supports the calculation of the required size of the operating passenger-car fleet in relation to the daily timetable of the train-formation station, while improving the planning of repair-facility capacity for major scheduled work. The study presents a case study of how a digital twin can be employed to model and analyze the process of sending a passenger railcar for scheduled repair. **Method:** probability-based and statistical analysis. **Results:** the proposed method enables real-time planning and adjustment operational performance indicators for the effective use of the railcar fleet as statistical information accumulates, taking into account the potential force majeure events; it also allows modelling of stochastic departures from prescribed time norms in cases where such norms are established. **Practical significance:** from a practical standpoint, the study offers benefits for entities within the railcar maintenance sector. Additionally, the insights derived are highly relevant for a broad spectrum of stakeholders, such as rolling stock owners, freight and passenger carriers, and operators managing non-traction fleets.

Keywords: passenger railcar, large-scale scheduled repairs/overhauls, organization of withdrawing railcars from the operational services for scheduled maintenance, random variable, probability-based model, digital twin technology

References

1. Vliyanie obostreniya global'nykh vyzovov na strategiyu tsifrovoj transformatsii naukoemkikh proizvodstv / T.N. Shushunova [i dr.] // Transportnoe delo Rossii. 2022. No.1. S. 131–133. (In Russian)
2. Ustich P. A., Ivanov A. A., Mazhidov F. A. Primenenie informatsionnykh tekhnologij v sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta vagonov // Byulleten' transportnoj informatsii. 2016. No. 9 (255). S. 13–21. (In Russian)

3. Stolyarov, A. D., Fajzullina A. M., Abramov V.I. Tsifrovaya transformatsiya logistiki predpriyatiya s ispol'zovaniem tsifrovyykh dvoynikov // Beneficium. 2024. No.2 (51). S. 23–31. (In Russian)
4. Ekonomika organizatsii (predpriyatiya): ucheb. posobie dlya studentov vuza, obuchayushchihnya po napravleniyam podgotovki 38.03.01 Ekonomika, 38.05.01 Ekonomicheskaya bezopasnost' / T. K. Rutkauskas [i dr.]. 2-e izd., pererab. i dop. Ekaterinburg: Izd-vo UMC UPI, 2018. 260 s. (In Russian)
5. Klyushin A.V. Tsifrovoy dvoynik modeli vagona. Osnovy kontseptsii, podkhody k realizatsii i perspektivy // Aktual'nye voprosy ekspluatatsii podvizhnogo sostava v sovremennykh usloviyakh: materialy Mezhdunarodnoy studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii (Nizhnij Novgorod, 21 aprelya 2021 goda). N. Novgorod, 2022. S. 70–74. (In Russian)
6. Lakin I.K., Semenov A.P. Ispol'zovanie tekhnologii "Tsifrovoy dvoynik" pri upravlenii remontom lokomotivov // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie. 2019. No. 3 (63). S. 89–98. (In Russian)
7. Ob ustanovlenii norm prostoya passazhirskikh vagonov pri tekhnicheskoy obsluzhivani, depovskom i kapital'nom remonte: ukazanie MPS Rossii ot 23.12.1997 no.V-1465u. (In Russian)
8. Plohih I.V. Ocenka i analiz pokazatelej gotovnosti vysokoskorostnogo poezda Velaro RUS ("Sapsan") s uchetom opyta Rossii i Germanii: diss. ... kand. tekhn. nauk. M., 2013. 217 s. (In Russian)
9. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostej. 4-e izd., stereotip. M.: Nauka, 1969. 576 c. (In Russian)
10. Programma ocenki effektivnosti ispol'zovaniya passazhirskikh vagonov na osnove monitoringa i statisticheskoy obrabotki dannykh ekspluatatsii: svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2024688607 Rossijskaya Federaciya. No.2024686940 / Shinkaruk A.S., Bepal'ko S.V., Ivanov A.A.; zayavl. 06.11.2024; opubl. 28.11.2024. (In Russian)

Received: 28.10.2025

Accepted: 19.01.2026

Author's information:

Aleksander A. IVANOV — PhD in Engineering,
Associate Professor; wwx720@mail.ru

Andrei S. SHINKARUK — PhD in Engineering;
Shinkarukas@mail.ru

Ivan A. VISHNYAKOV — Postgraduate Student RUT;
Dalisan5555@gmail.com