Разработка подходов к применению информационных технологий для улучшения управления объектами и процессами железнодорожного пассажирского комплекса

А.С. Шинкарук[1], Р.Р. Савчук[2], А.А. Рогов[2], Р.А. Петров[2], Г.Е. Дружинин[2], М.Р. Плешаков[2]

[1]АО «Федеральная пассажирская компания»
[2]Российский университет транспорта, Москва

Аннотация: В статье рассматривается проблема контроля и управления в транспортных системах на примере процессов эксплуатации пассажирского железнодорожного подвижного состава с использованием средств информатизации и автоматизации. Основными предлагаемыми методами повышения эффективности управления эксплуатацией транспортных средств являются применение цифрового моделирования объектов и процессов транспортного комплекса и автоматизация проведения вероятностно-статистического анализа данных о технических и эксплуатационных характеристиках системы. Основной задачей исследования является разработка общего подхода к применению методов цифрового моделирования и анализа данных для улучшения управления эксплуатацией пассажирского подвижного состава. Рассмотрено применение цифровых моделей единиц подвижного состава и цифровизация процесса ремонта. Предложено использование автоматизации методов статистического анализа потока данных о показателях эксплуатации и технического состояния пассажирских вагонов. Даны общие рекомендации по применению информационных инструментов для улучшения управления эксплуатацией пассажирским подвижным составом железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: информационные технологии, цифровое моделирование, цифровой двойник, автоматизированное управление, системный анализ, процессный подход, надежность, эксплуатация подвижного состава, техническое обслуживание и ремонт, системы мониторинга.

Введение

Информационные интеллектуальные системы, как эффективное средство управления, контроля и автоматизации в производственных, транспортных и других сложных технических комплексах испытывают интенсивное развитие и охватывают все более широкие области применения в соответствии с потребностями научно-технического прогресса человечества, знаменуя глобальный переход к технологическому укладу Индустрии 4.0.

Современные информационные технологии обладают широким спектром новых интеллектуальных методов, инструментов и алгоритмов,

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

позволяющих на базе быстродействующих вычислительных устройств, использования больших данных, новейших аппаратных комплексов мониторинга, контроля и управления, эффективно решать сложные практические задачи для эксплуатируемых и проектируемых технических систем. Можно указать такие новейшие информационные подходы, средства и методы, как: нейро-сетевое программирование, цифровое моделирование, блокчейн, биоинформационные технологии, BIM-технологии, алгоритмы быстрого поиска и анализа больших данных, алгоритмы интеллектуального управления, а также ряд других информационных средств решения научно-технических проблем.

Актуальность исследования обусловлена важностью применения новейших информационных методов и инструментов для решения задач повышения эффективности управления, повышения производительности, надежности, безопасности и качества функционирования сложных технических систем на примере железнодорожного пассажирского транспортного комплекса.

Целью исследования является повышение эффективности эксплуатации, надежности и безопасности железнодорожного пассажирского подвижного состава (ПС) на основе разработки цифровых двойников подвижного состава и цифровых моделей процессов его эксплуатации.

Основными задачами исследования являются:

- анализ проблематики управления эффективностью, надежностью, безопасностью эксплуатации железнодорожного пассажирского подвижного состава;

- разработка концепции применения цифрового моделирования для решения актуальных задач эксплуатации железнодорожного подвижного состава;

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

- разработка подходов к созданию цифровых моделей отдельных процессов эксплуатации железнодорожного пассажирского подвижного состава;

- разработка подходов к автоматизации методов вероятностного и статистического анализа потока данных об эксплуатации и техническом состоянии пассажирского подвижного состава железнодорожного транспорта.

Гипотеза исследования заключается в предположении об эффективности применения новых информационных технологий для решения практических задач управления эксплуатацией подвижного состава железнодорожного транспорта.

Методы и объекты исследования

В настоящее время внутренняя нормативная документация и организация процессов по управлению железнодорожным подвижным составам, его техническому обслуживанию и ремонту, использует традиционные подходы к эксплуатации транспорта, основанные на многолетнем опыте эксплуатации оборудования, данных об эксплуатационных характеристиках и отказах оборудования, систем и узлов подвижного состава. Отметим, что в целом, используемые подходы носят в значительной степени реактивный характер. За счет интенсивного развития транспортной инфраструктуры и транспортных технологий в России проектируется и выпускается ряд новых моделей подвижного состава (ПС), имеющих улучшенные эксплуатационные и перевозочные характеристики, обеспечивающие повышение надежности, скорости движения, нагрузок на ось, а также повышение показателей качества оказания услуги перевозки на основе новых технических решений [1, 2]. Развитие и обновление подвижного состава и транспортной инфраструктуры требуют применения новых решений по контролю и управлению эксплуатацией транспортных

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

средств, обеспечивающих технические и потребительские требования к надёжности, безопасности и качеству на современном уровне с максимальным использованием больших данных об эксплуатации, позволяющих осуществлять управление на основе онлайн мониторинга транспортных процессов с использованием моделей анализа и прогноза [3-5].

Развитие новых информационных технологий, аппаратных средств мониторинга, подходов к моделированию систем и процессов предоставляет новые методы и инструменты для улучшения управления эксплуатацией подвижного состава на транспорте, контроля его технического состояния, технического обслуживания и ремонта [6-8]. Наиболее перспективными являются предиктивные подходы, позволяющие на основе технического и процессного моделирования осуществлять управление эксплуатацией с учетом новых данных и новых условий внутренней и внешней среды технических систем.

Для сбора, консолидирования, анализа данных онлайн мониторинга транспортных процессов и принятия на основе проведенного анализа и прогноза решений по управлению эксплуатацией железнодорожного подвижного состава, одним из эффективных подходов является цифровое моделирование объектов и процессов железнодорожной пассажирской перевозки [9, 10]. Использование методики цифрового моделирования и создания цифровых двойников позволяет собирать, обрабатывать и управлять информацией об эксплуатации подвижного состава в рамках информационной подсистемы, интегрированной в общую информационную систему транспортной организации и более широкие транспортные информационные системы [11].

Рассмотрим в качестве примера железнодорожный пассажирский вагон, контроль его технического состояния, управление техническим обслуживанием и ремонтом. Проанализируем возможность применения

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

информационных технологий с использованием моделирования объектов и процессов в технических системах.

Для формализации общей постановки задачи и разработки применения методов цифрового моделирования применим подходы системного анализа. Рассмотрим подход от частного к общему. Отметим объекты, необходимые для проведения исследования. Двумя основными группами объектов являются пассажирские вагоны в составе эксплуатируемого вагонного парка, а также пункты технического обслуживания и вагонно-ремонтные предприятия (ВРП). Поскольку разрабатываемые информационные решения интегрируются в информационную систему (ИС) обеспечивающую эксплуатацию пассажирских вагонов, то она также становится объектом формализуемой системы. При классическом реактивном подходе взаимодействие этих объектов регламентировано и в незначительной степени учитывает потоки накопленной и текущей информации для совершенствования управления эксплуатацией и обеспечения технической надежности. Отметим отсутствие детализированного контроля и систематизации технических отказов с сохранением и обработкой данных соответствующих информационных потоков, а также недостатки системного информационного обеспечения процессов диагностики, технического обслуживания и ремонта. Потоки информации не систематизируются, не выявляются статистические временные эксплуатационные закономерности. Это является недостатками, не позволяющими осуществлять на должном уровне улучшение качества эксплуатации пассажирских вагонов по надежности и эффективности содержания вагонного парка. Для корректировки предлагается провести поиск решения с использованием информационных подходов на основе применения цифрового моделирования. В таблице №1 представлены общие информационные решения по выявленным проблемам.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Таблица № 1

Разработка информационных решений для улучшения управления эксплуатацией пассажирских вагонов

Объекты и процессы	Недостатки эксплуатации ПС	Причины выявленных недостатков	Информационные предложения по улучшению
Пассажирский вагон	Технические отказы	Недостатки контроля технического состояния вагона	Внедрение аппаратно-программной системы контроля технического состояния на основе датчиков неразрушающего контроля
		Недостатки системы сбора и статистической обработки данных об отказах	Организация автоматизированного анализа статистики отказов, ранжированной по причинам
		Недостатки регламентов технического обслуживания и ремонта	Информационные инструменты управления содержанием по фактическому состоянию
	Реактивный характер управления эксплуатацией и техническим содержанием	Недостатки данных истории эксплуатации, отказов, содержания, ремонта	Организация сбора, сортировки, хранения, анализа эксплуатационных и технических показателях вагонов на протяжении всего периода
		Недостатки анализа и прогнозирования эксплуатационных показателей, технического состояния	Управление эксплуатацией на основе построения моделей состояния объекта, анализа и прогноза временных рядов и пространственных данных
		Недостаточная гибкость управления эксплуатацией, отсутствие онлайн потока данных о состоянии вагона.	Информационные инструменты принятия решений по управлению с учетом потока информации и построения прогнозных моделей

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Продолжение таблицы №1			
Объекты и процессы	Недостатки эксплуатации ПС	Причины выявленных недостатков	Информационные предложения по улучшению
Ремонт вагонов	Отсутствие истории данных о технических отказах вагона	Отсутствие ведения статистики по дефектации вагонов	Ведение полной статистики дефектации вагонов на основе цифрового паспорта ремонта вагона
	Отсутствие мониторинга процесса ремонта вагона	Отсутствие потока данных о характерных показателях этапов процесса ремонта и их автоматизированного контроля	Формирование пула показателей онлайн состояния процесса ремонта на основе модели цифрового двойника вагоноремонтного предприятия
	Отсутствие анализа процесса ремонта вагона	Нет анализа узких мест процесса ремонта, оценки загруженности и производительности производственных участков, анализа оборота запасных частей	Информационный анализ процесса ремонта на основе инструментов процессного подхода, управления качеством, бережливого производства
Информационная система подразделений эксплуатации подвижного состава	Недостатки сбора, обработки, предоставления информации	Отсутствие аппаратно-программного комплекса мониторинга ремонта вагона	Разработка модели цифрового двойника вагона
			Разработка модели паспорта ремонта вагона
		Отсутствие аппаратно-программного комплекса мониторинга процессов вагоноремонтного предприятия	Разработка модели цифрового двойника процесса ремонта вагона
			Разработка модели цифрового двойника вагоноремонтного предприятия
Эксплуатация вагонов	Недостатки анализа и прогноза характеристик эксплуатация вагонов	Отсутствие статистико-вероятностной аналитики характеристик эксплуатация вагонов	Разработка автоматизированных алгоритмов формирования, анализа и прогноза на основе моделирования по характеристикам эксплуатации вагонов

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Представим общую целевую модель системы эксплуатации парка пассажирских вагонов для формализации рассмотренных объектов, методов и решений:

$$WFO \stackrel{\text{def}}{=} \langle W, WRP, GIS, DFS, WDMS, RPMS, DTW, DTRP, SAWD, SAWR, SAWO) \rangle, \quad (1)$$

где: WFO (wagon fleet operation system) – система эксплуатации парка вагонов; WRP (wagon repair plants) – вагоноремонтные предприятия; GIS (general information system) – общая информационная система; DFS (data flow system) – система потоков данных; WDMS (wagon defect monitoring system) – комплекс мониторинга дефектов вагона; RPMS (repair process monitoring system) – комплекс мониторинга процесса ремонта; DTW (digital twin of a wagon) – цифровой двойник вагона; DTRP (digital twin of the repair process) – цифровой двойник процесса ремонта; DTWR (digital twin of a wagon repair plant) – цифровой двойник вагоноремонтного предприятия; SAWD (a system of algorithms for analyzing statistics of wagon defects) – система алгоритмов и программного обеспечения анализа статистики дефектов вагона; SAWR (a system of algorithms for analyzing wagon repair indicators) – система алгоритмов и программного обеспечения анализа показателей ремонта вагона; SAWO (a system of algorithms for analyzing wagon operating indicators) – система алгоритмов и программного обеспечения анализа показателей эксплуатации вагона.

На основе проведенного общего анализа и построенной модели эксплуатации парка вагонов рассмотрим более подробно предложения по разработке указанных систем.

Результаты и обсуждения

В соответствие с моделью (1) системы эксплуатации вагонов, представим на рис.1 общую схему вхождения разрабатываемых цифровых

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

моделей, систем мониторинга и аналитических систем в ИС эксплуатанта вагонов.

Рис. 1. – Схема предлагаемых информационных решений по улучшению управления эксплуатацией вагонов

Рассмотрим задачу разработки модели цифрового двойника пассажирского вагона. Цифровой двойник вагона включает широкий набор консолидированных данных, необходимых для контроля и управления на разных этапах его эксплуатации. Предлагается следующий состав информации, входящий в цифровую модель вагона:

- геометрическая 3-D модель кузова и основных технических систем вагона, включая расположение датчиков измерения технических параметров (давления, температуры, количества рабочих жидкостей, силы тока и напряжения в электросетях) и датчиков неразрушающего контроля (лазерного, ультразвукового, акустического), определяющих начальные стадии износа, дефектов, технических отклонений [12, 13];

- геоинформационная модель, регистрирующая в режиме реального времени временные треки перемещения вагона;

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

- информация о временном потоке отказов-восстановлений, о зарегистрированных причинах отказов, данных о проведенных ремонтах и заменах деталей и узлов на всем протяжении этапов эксплуатации;

- информация о временном потоке состояний эксплуатации вагона (в составе поезда, в резерве, в ремонте);

- информация об инцидентах, связанных с техническим состоянием, обслуживанием и ремонтом вагона.

Получаемая в онлайн и дискретном режиме информация о состоянии вагона собирается, накапливается, передается, обрабатывается и анализируется на протяжении срока эксплуатации вагона.

Рассмотрим более подробно аппаратно-программный комплекс диагностики технического состояния оборудования и узлов вагона. Схема диагностики представлена на рис. 2.

Рис. 2. – Схема диагностики технического состояния пассажирского вагона

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Дискретной и онлайн диагностике в первую очередь подвергаются узлы, устройства и системы, имеющие статистически наиболее частые отказы (по принципу Парето), а также критически важные элементы, имеющие существенный уровень риска по оценке с помощью инструментов технической надежности и управления рисками (матрицы «последствий-вероятности», FMEA-анализа, анализа дерева отказов FTA, логико-вероятностного анализа надежности системы) [14]. Также контролируется состояние оборудования, определяющего уровень комфорта для пассажира (вентиляция, кондиционирование, отопление, системы туалетных комплексов).

В ходе проведения мониторинга технического состояния ПС идентифицируются следующие диагностические события:

- отказ элементов, узлов, оборудования и инженерных систем;
- нарушение регламентированной штатной работы вагона;
- нарушение температурного режим эксплуатации оборудования;
- отклонения в характеристиках работы оборудования и систем;
- приближение или наступление критического состояния оборудования.

Важно отметить, что для реализации мониторинга технического состояния вагона в онлайн режиме с непрерывной передачей данных в информационную систему, для контроля состояния ключевых технических узлов необходимо подобрать соответствующий комплекс датчиков и устройств неразрушающего дискретного или непрерывного контроля.

Рассмотрим цифровую модель ВРП и цифровую модель процесса ремонта. Важным фактором создания данной цифровой модели является информационное отображение процесса и всех данных по ремонту вагона, ведение полной статистики по этапам ремонтов, дефектации и замене узлов и деталей, что является необходимым для управления и выравнивания

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

процесса ремонта, управления запасами, ремонтом и оборотом запчастей, движением всех обеспечивающих ресурсов [15].

Общая схема процесса проведения ремонта пассажирского вагона представлен на рис. 3.

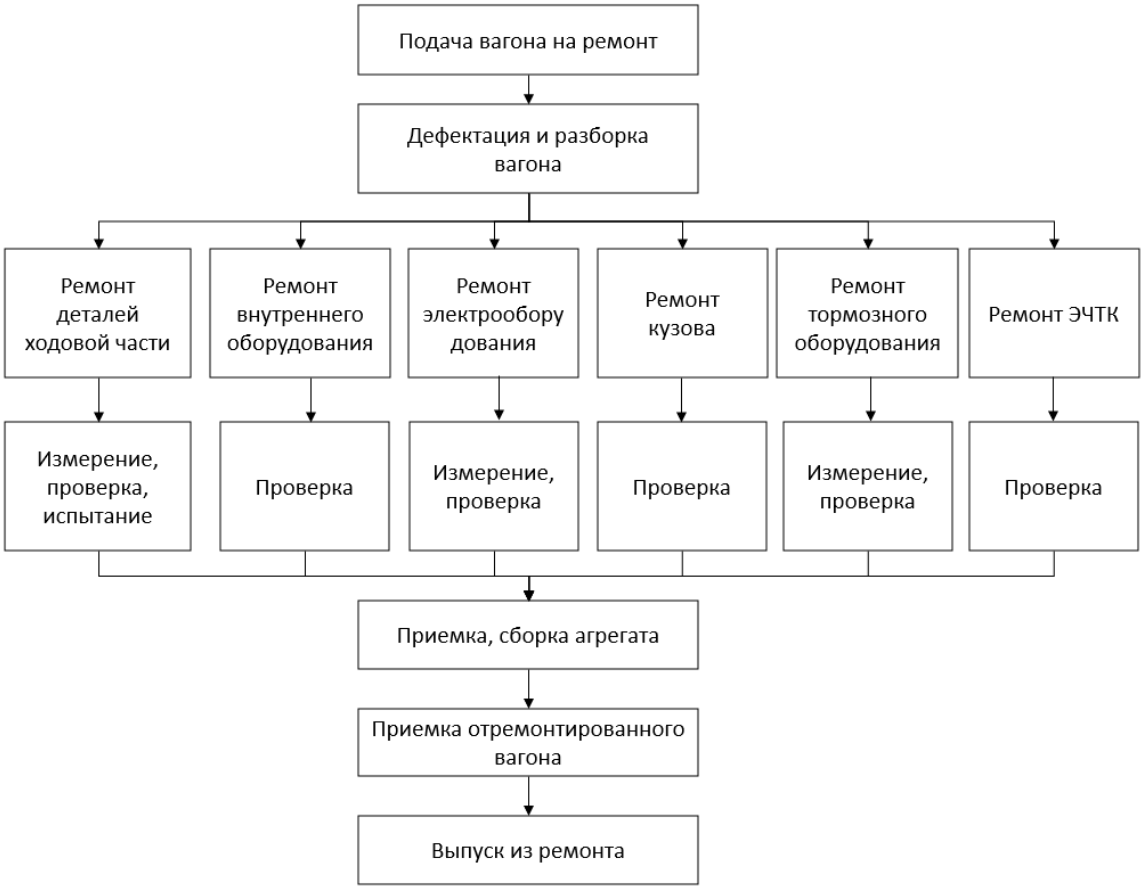

Рис. 3. – Схема процесса ремонта пассажирского вагона

Рассмотрим далее методику и результаты анализа дефектов, являющихся причинами отправления вагона в ТОР.

Для анализа дефектов применим такие инструменты, как контрольный листок и диаграмма Парето выявленных несоответствий.

Поскольку данные об отказах узлов и систем вагона зависят от его модели, сроков и условий эксплуатации, проводимых ремонтов, то применение указанных инструментов анализа возможно эффективно использовать для управления эксплуатацией ПС в случае применения системно организованных информационных средств автоматизации

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

алгоритмов обработки больших данных мониторинга отказов по всем однородным группам вагонов с анализом результатов в течение длительного времени. Для примера возьмем статистику отвлечений пассажирских вагонов в количестве 983 единиц на внеплановый ремонт за 2024 г. по сети РЖД. Фрагмент ранжированной статистика причин отказов представлен в таблице №2.

Таблица № 2

Контрольный листок причин технических отказов пассажирских вагонов

Несоответствия	Число несоответствий	Процентная доля	Накопленный процент
Выщербина на поверхности катания КП (код 006)	353	20,7%	20,7%
Замена масла в редукторе (код 811)	253	14,9%	35,6%
Сверхнормативный прокат (код 004)	187	11,0%	46,6%
Тонкий гребень (код 022)	126	7,4%	54,0%
Сцепное устройство (код 931)	106	6,2%	60,2%
Круговой наплыв металла (код 007)	64	3,8%	64,0%
Генератор (код 744)	55	3,2%	67,2%
Ползун на поверхности КП (код 005)	54	3,2%	70,4%
Кондиционирование воздуха (код 762)	50	2,9%	73,3%
Высоковольтное оборудование (код 756)	47	2,8%	76,1%
Пульт управления (код 352)	42	2,5%	78,6%
Вентиляция (код 773)	30	1,8%	80,3%
…	…	…	…
Всего	1702	100%	100%

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

На рис. 4 представлена диаграмма Парето для статистики отказов вагонов, построенная по контрольному листку отказов.

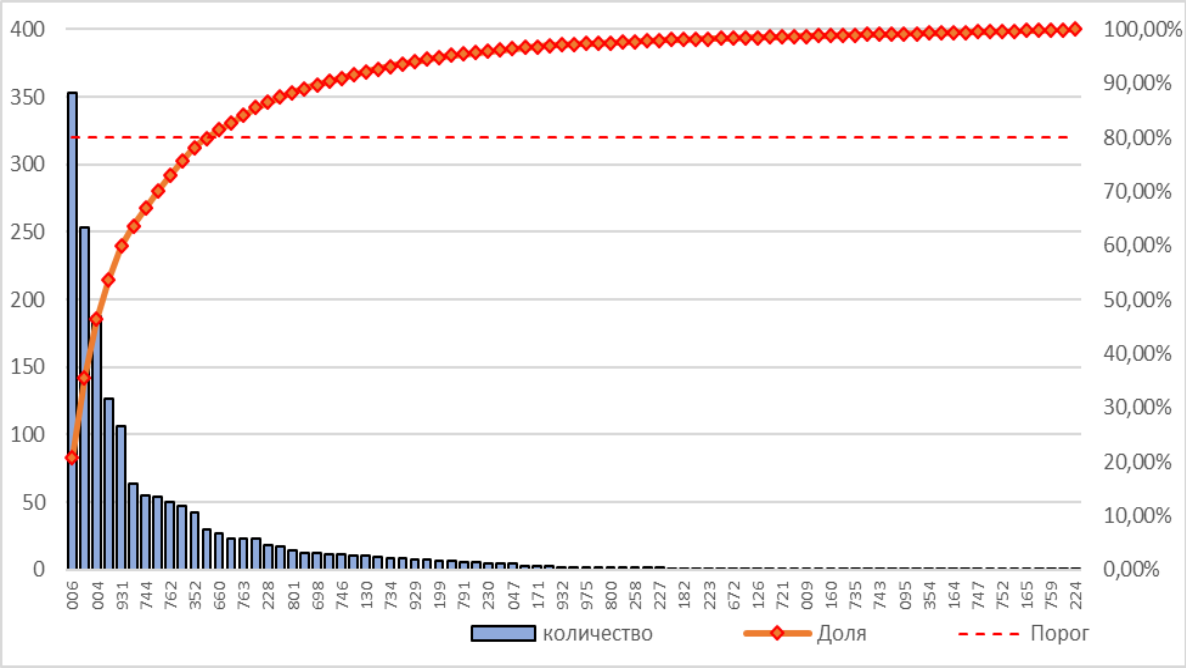

Рис. 4. – Диаграмма Парето причин технических отказов пассажирских вагонов

Согласно принципу Парето, основными являются причины, дающие 80% несоответствий (их доля может составлять порядка 20%), остальные причины менее существенны и обрабатываются во вторичном приоритете. В данном случае, это первые двенадцать причин по контрольному листку. На разработку мероприятий, направленных на снижение вероятности возникновения таких отказов рекомендуется обратить наибольшее внимание.

Также результаты такого автоматизированного анализа передаются в информационные системы вагоноремонтных предприятий для улучшения управления оборотом и созданием необходимых запасов запчастей для ремонта пассажирских вагонов, управления ресурсами [15, 16].

Представим методику и результаты моделирования эксплуатационных показателей пассажирского вагона, которые рекомендуется осуществлять в

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

автоматизированном режиме с использованием предлагаемых инструментов моделирования.

Рассмотрим основные показатели эксплуатации пассажирских вагонов. Поскольку в числе важнейших аспектов эксплуатации вагонов мы рассматриваем техническую надежность, мониторинг процессов эксплуатации, мониторинг технического состояния, процесс ремонта вагонов, то в качестве времени наблюдения для каждого вагона парка мы возьмем время между двумя плановыми ремонтами вагонов, проводимые на базе ВРП.

В число основных наблюдаемых показателей входят: итоговый пробег вагона (км), общее время использования вагона в составе поезда (все временные показатели измеряются в сутках), время ожидания (нахождение в резерве), общее время нахождения вагона в текущем отцепочном ремонте (ТОР), общее время эксплуатации (время наблюдения), время от начала эксплуатации до отправления вагона в первый текущий отцепочный ремонт (ТОР-1), время между первым ремонтом и отправлением вагона во второй текущий отцепочный ремонт (ТОР-2), время между вторым ремонтом и отправлением вагона во третий текущий отцепочный ремонт (ТОР-3).

Данные показатели постоянно наблюдаются для всего парка эксплуатируемых вагонов (например, в АО «ФПК» их более 4000 единиц). Однако значения наблюдаемых показателей эксплуатации различаются для разных моделей вагонов, вследствие отличий в их конструкционных особенностях, используемых материалах и технологиях производства. Значения параметров зависят также от количества лет эксплуатации вагона, вследствие износа и результатов проведенных ремонтов в ходе эксплуатации.

В качестве примера приведем статистику наблюдений за эксплуатацией однотипных вагонов модели 61-4465 (двухэтажный купейный вагон) в количестве 44 единиц, с одинаковым сроком эксплуатации 8 лет. Фрагмент

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

статистической выборки по наблюдению эксплуатационных показателей указанной группы вагонов представлен в Таблице №3.

Таблица № 3

Статистика показателей эксплуатации пассажирских вагонов модели 61-4465

Номер вагона	1	2	…	42	43	44	Средние значения
Итоговый пробег, (км)	599475	581333	…	549874	578112	599415	582699,7
Время использования, (суток)	669	649	…	617	628	684	647,1
Время ожидания, (суток)	316	230	…	368	393	284	335,7
Время в ТОР, (суток)	18	3	…	4	4	5	4,5
Время эксплуатации, (суток)	1003	882	…	1003	1034	973	992,8
Время до ТОР-1, (суток)	547	790	…	606	699	882	731,78
Время до ТОР-2, (суток)	116		…	171	141		134,9
Время до ТОР-3, (суток)	235		…		59		147

Для улучшения управления эксплуатацией вагонов удобно использовать статистико-вероятностный анализ, в результате которого будут построены статистические функции распределения $F(t)$ и плотности $f(t)$ для исследуемых показателей эксплуатации как для непрерывных случайных величин. Знание данных функций позволяет осуществлять решение задач управления эксплуатацией пассажирских вагонов с учетом их модели и продолжительности эксплуатации на основе анализа вероятностных распределений их эксплуатационных характеристик. Статистические функции рассчитываются как дискретные, для чего ось независимой

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

переменной разбивается на промежутке наблюдения равными интервалами $[t_i; t_{i+1}]$, $i = 0, 1, 2, 3, \ldots$.

Дискретный вид функции распределения $F(t)$ рассчитывается по формуле:

$$F(t_i) = \frac{n_i(t)}{N_0}, \quad (2)$$

где: N_0 – число вагонов в выборке; $n_i(t)$ – число реализаций значений параметров в выборке, принадлежащих интервалу $[0 ; t_i]$.

Дискретный вид функции распределения $F(t)$ рассчитывается по формуле:

$$f(t_i) = \frac{\Delta n_i(t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (3)$$

где: $\Delta n_i(t)$ – число реализаций значений параметров в выборке, принадлежащих интервалу $[t_{i-1} ; t_i]$; $\Delta t = t_{i+1} - t_i$.

Поскольку для решения практических задач управления на основе анализа вероятностных функций $F(t)$, $f(t)$, их запись в дискретной форме является неудобной, то наиболее предпочтительной формой является аналитическая запись. Для этого проводим аппроксимацию вероятностных функций на основе выбранного исследователем метода моделирования. В рассматриваемом случае предлагается применить для получения аналитических моделей метод наименьших квадратов (МНК).

Рассмотрим результат моделирования вероятностного распределения для эксплуатационных показателей «Время от начала эксплуатации до ТОР-1» (что соответствует наработке до первого отказа) и «Общее время нахождения вагона в ТОР» как случайных величин. В данном случае исследования по выбору модели показали, что наилучшим качеством аппроксимации (по коэффициенту детерминации) обладает модель полинома шестой степени.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

На рис. 5 представлен график дискретной статистической функции плотности непрерывной случайной величины «Время от начала эксплуатации до ТОР-1» и ее моделирования по МНК.

Рис. 5. – Моделирование функции плотности распределения *f(t)* показателя «Время до ТОР-1»

В результате получена модель со следующего аналитического вида:

$$\hat{f}(t) = -10^{-18}x^6 + 3{\cdot}10^{-15}x^5 - 3{\cdot}10^{-12}x^4 + 2{\cdot}10^{-9}x^3 - 5{\cdot}10^{-7}x^2 + 6{\cdot}10^{-5}x - 0{,}0019 \quad (4)$$

Оценка тесноты связи (качества модели) по коэффициенту детерминации $R^2 = 0{,}93$ показывает высокое качество аппроксимации.

На Рис. 6 представлен график дискретной функции плотности параметра «Общее время нахождения вагона в ТОР» и ее МНК-модели.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

Рис. 6. – Моделирование функции плотности распределения показателя «Общее время в ТОР»

В результате получена следующая аналитическая модель:

$$\hat{f}(t) = -4{\cdot}10^{-7}x^6 + 3{\cdot}10^{-5}x^5 - 8{\cdot}10^{-4}x^4 + 0{,}0117x^3 - 0{,}0824x^2 + 0{,}2376x - 0{,}0397 \quad (5)$$

Значение коэффициента детерминации $R^2 = 0{,}99$ показывает высокое качество модели. Далее по построенным моделям возможно определение характерных и агрегированных показателей, необходимых для управления эксплуатацией, в том числе: времени гамма-обеспеченной безотказной работы (расчет наработки на отказ, гарантированной с заданной доверительной вероятностью, например, $\Upsilon = 0{,}95$); интенсивности отказов и интенсивности восстановлений в модели потока отказов-восстановлений при эксплуатации вагона; параметров содержания вагонов в резерве и других контролируемых характеристик процесса эксплуатации вагона.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

На основе построенных временных моделей показателей эксплуатации можно проводить анализ и создавать предиктивную модель управления эксплуатацией подвижного состава по его текущему и прогнозному состоянию.

В данном случае «ручные» расчеты и моделирование из-за сложности реализации обладают рядом недостатков, а именно, могут быть только локальными, без использования широкой статистики, на незначительном временном горизонте анализа, без охвата по всем эксплуатируемым моделям вагонов с учетом продолжительности эксплуатации, без исследования дрейфа контрольных эксплуатационных характеристик на длительном временном периоде. Вследствие чего эффективность практического применения такого подхода для корректировки управления эксплуатацией вагонного парка становится в значительной степени ограниченной.

Предлагается автоматизировать рассмотренные алгоритмы статистико-вероятностных исследований и моделирования, что позволит реализовать программу проведения моделирования, анализа и прогнозирования для процессов эксплуатации вагонов с использованием больших статистических данных, на продолжительном времени наблюдения, с выявлением динамики основных контрольных характеристик объектов и процессов.

Заключение

Проведенное исследование показывает, что использование цифрового моделирования объектов и процессов пассажирского железнодорожного транспортного комплекса позволяет осуществлять корректировку и улучшение управления основными перевозочными процессами, в том числе, эксплуатацией подвижного состава, на основе мониторинга технического состояния и процессов транспортной системы. Применение статистико-вероятностного анализа данных позволяет создавать прогнозные модели и

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

использовать большие данные для поддержки и реализации концепции предиктивного управления железнодорожным транспортным комплексом.

Литература

1. Мамаев Э. А., Гуда А. Н., Годованый К. А. Модель активности агентов в транспортно-логистических и технологических системах // Инженерный вестник Дона, 2021, № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7345.

2. Tagiltseva J.A., Kuzina E.L., Drozdov N.A., Vasilenko M.A., Kuzina M.A., Korenyakina N.N. The International Cargo Transportations in South Russian Transport and Logistics System // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, Yaroslavl, 2021. – pp. 248-251.

3. Guskova M.F. , Shutina A.O., Trofimov D.A. Modeling the digital twins of transport infrastructure objects // Proceedings of the 2020 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2020, Yaroslavl, 2020. – pp. 368-371.

4. Telyatnikova N.A., Guskova M. F., Pereselenkov G. S. Analysis of the transport system development & prospects of transport construction in Russia // Proceedings of the 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2017, St. Petersburg, 2017. – pp. 114-116.

5. Struchalin V.G., Narusova E.Y. Simulation of the dangerous events occurrence in technological processes in railway transport. Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, 2021. pp. 127-130.

6. Шиян В.И., Вишняков Д.И., Власов С.М., Костров А.А., Тузовский Е.Е., Щербаков М.И. Программирование с использованием модели акторов

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

на платформе Akka: концепции, паттерны и примеры реализации. // Инженерный вестник Дона. 2025. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9934

7. Guskova M.F., Nemtsov Y.V., Telyatnikova N.A., Myasnikova S.V. Assessment of the Quality of Radio Coverage by a Mobile Radiotelephone Network of a Railway Section Using the Method of Fuzzy-set Theory Approach // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022, St. Petersburg, 2022. – pp. 38-42.

8. Narusova E.Y., Struchalin V.G., Paruleva I.V., Procopchuk I.S., Lebedeva A.S. Organization of safe movement of rolling stock at a freight railway station based on automated control systems. Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. 2022. pp. 1723-1726.

9. Евсеев Д.Г., Шинкарук А.С., Куликов Ю.М. Цифровизация элементной базы пассажирского вагона на примере ремонта колесной пары // Мир транспорта. – 2023. – Т. 21, № 6(109). – С. 65-71.

10. Рогозов Ю. И., Скороход Д. С., Скороход С. В., Кучеров С. А. Анализ возможности применения механизмов как промежуточной нотации при переходе к BPMN // Инженерный вестник Дона, 2023, № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8755.

11. Ханова А. А., Бондарева И. О., Нестерова Е. Т., Кинжалиева А. Р. Разработка стратегии цифровой трансформации предприятия // Инженерный вестник Дона, 2021, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7112.

12. Круглов М. А., Холкин А. В. Метод построения трехмерной графики на основе полей расстояний // Инженерный вестник Дона, 2024, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9384.

13. Пекарь С.А., Смелов В.В. Математическая модель интеллектуального поведения 3D-объекта // Управление информационными ресурсами: Материалы XIV Международной научно-практической

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

конференции, Минск: Академия управления при Президенте Республики Беларусь, 2017. – С. 253-257.

14. Drozdov N.A., Kuzina E.L., Prokopchuk V.Y., Vasilenko M.A., Tagiltseva J.A., Kuzina M.A. The Risk Management in the Urbanized Territories Transport Infrastructure // Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, – Yaroslavl, 2021. – pp. 152-155.

15. Шинкарук А.С., Куликов М.Ю., Барышников А.В. Совершенствование производственных и управленческих процессов при ремонте и техническом обслуживании пассажирских вагонов с использованием «цифровых двойников» // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 12(36). – С. 70-77.

16. Шамраев В.В., Шамраева Т.А., Сидраков А.А. Разработка и внедрение модели «Цифровая путевая машинная станция» как механизм обеспечения автоматизированного управления на объектах железнодорожной инфраструктуры // Аспирантские чтения: Сборник научных статей аспирантов ИПСС РУТ (МИИТ). Том Выпуск 5. – Москва: Издательство «Перо», 2023. – С. 193-197.

References

1. Mamaev E`. A., Guda A. N., Godovanyj K. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021, № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2021/7345.

2. Tagiltseva J.A., Kuzina E.L., Drozdov N.A., Vasilenko M.A., Kuzina M.A., Korenyakina N.N. The International Cargo Transportations in South Russian Transport and Logistics System. Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, Yaroslavl, 2021. pp. 248-251.

3. Guskova M.F. , Shutina A.O., Trofimov D.A. Proceedings of the 2020 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information

Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2020, Yaroslavl, 2020. pp. 368-371.

4. Telyatnikova N.A., Guskova M. F., Pereselenkov G. S. Analysis of the transport system development & prospects of transport construction in Russia. Proceedings of the 2017 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", IT and QM and IS 2017, St. Petersburg, 2017. pp. 114-116.

5. Struchalin V.G., Narusova E.Y. Proceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, 2021. pp. 127-130.

6. Shiyan V.I., Vishnyakov D.I., Vlasov S.M., Kostrov A.A., Tuzovsky E.E., Shcherbakov M.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 3 (123). С. 342-348. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9934

7. Guskova M.F., Nemtsov Y.V., Telyatnikova N.A., Myasnikova S.V. Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022, St. Petersburg, 2022. pp. 38-42.

8. Narusova E.Y., Struchalin V.G., Paruleva I.V., Procopchuk I.S., Lebedeva A.S. Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. 2022. pp. 1723-1726.

9. Evseev D.G., Shinkaruk A.S., Kulikov Yu.M. Mir transporta. 2023, № 6(109). pp. 65-71.

10. Rogozov Yu. I., Skoroxod D. S., Skoroxod S. V., Kucherov S. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8755.

11. Xanova A. A., Bondareva I. O., Nesterova E. T., Kinzhalieva A. R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7112.

12. Kruglov M. A., Xolkin A. V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9384.

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025

13. Pekar` S.A., Smelov V.V. Upravlenie informacionny`mi resursami: Materialy` XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Minsk: Akademiya upravleniya pri Prezidente Respubliki Belarus`, 2017. pp. 253-257.

14. Drozdov N.A., Kuzina E.L., Prokopchuk V.Y., Vasilenko M.A., Tagiltseva J.A., Kuzina M.AProceedings of the 2021 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies", T and QM and IS 2021, Yaroslavl, 2021. pp. 152-155.

15. Shinkaruk A.S., Kulikov M.Yu., Bary`shnikov A.V. Transportnoe mashinostroenie. 2024. № 12(36). pp. 70-77.

16. Shamraev V.V., Shamraeva T.A., Sidrakov A.A. Aspirantskie chteniya: Sbornik nauchny`x statej aspirantov IPSS RUT (MIIT). Moskva, 2023. pp. 193-197.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 12.10.2025

Дата публикации: 26.11.2025

© Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2025