

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПУТЕВЫХ МАШИННЫХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

В статье рассматриваются особенности математического моделирования этапов жизненного цикла путевых машинных комплексов при различных технологиях путевых работ, формируемых из различных единиц специального подвижного состава (СПС). Модель учитывает особенности эксплуатации СПС в части влияния на повышение уровня его безопасной эксплуатации и снижения травматизма.

Ключевые слова: моделирование, специальный подвижной состав, надежность, безопасность, охрана труда, железнодорожный путь

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_93



А.А. Локтев



П.В. Сычев

Техническое состояние путевых машин и механизмов, используемых при организации ремонтных работ и эксплуатации железнодорожного пути и, в целом, специального подвижного состава всех типов имеет важное значение в обеспечении требуемого уровня охраны труда и безопасности при выполнении всего комплекса работ на железнодорожном пути. Техническое состояние специального подвижного состава определяется, в первую очередь, техническими

характеристиками конкретного типа такого подвижного состава, эксплуатационными характеристиками, которые задают критерии требуемого качества выполнения технологических процессов специальным подвижным составом. Требуемый уровень безопасности при производстве комплекса работ на пути также зависит от жизненного цикла специального подвижного состава и от реализации отдельных его этапов (см., например, [1]), это в полной мере подтверждается при выполне-

Локтев Алексей Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: механика деформированного тела, моделирование объектов транспортной инфраструктуры, железнодорожный путь, реконструкция объектов исторического и архитектурного наследия. Автор 186 научных работ, в том числе трех монографий.

Сычев Петр Вячеславович, кандидат технических наук, начальник отдела ООО «ВАГОНПУТЬМАШ». Область научных интересов: математическое моделирование и автоматизация технологических процессов и технических средств преимущественно для технического обслуживания железнодорожного пути. Автор 54 научных работ. Имеет 10 патентов на изобретения.

Аксенов Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: технология транспортного машиностроения, ресурсосберегающие технологии на транспорте. Автор более 200 научных работ, в том числе четырех монографий, одного учебника и 14 учебных пособий.

Пикалов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор Центра Инфраструктурных технологий АО «СТМ». Область научных интересов: организация строительства и эксплуатации железнодорожной инфраструктуры, технологии ремонта и эксплуатации железнодорожного пути, надежность технологических процессов, современные технологии на жизненном цикле железнодорожной инфраструктуры. Автор 36 научных работ.

Сычев Вячеслав Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: создание новых технологий и технических средств для повышения эффективности технического обслуживания железнодорожного пути. Автор более 100 научных работ. Имеет 20 патентов на изобретения.

нии статистического анализа имеющихся данных по производственному травматизму отнесенному как к путевым работам, так и к эксплуатации специального подвижного состава, в том числе, отдельно следует отмечать просроченный ремонт или модернизацию путевой техники.

Постановка задачи

Общее состояние специального подвижного состава в произвольный момент его жизненного цикла может быть описано вектором его состояний $(X, Y, Z \dots)$ и их колебаниями, вблизи некоторого равновесного положения (состояния), которые обусловлены отличием и уникальностью каждого набора условий эксплуатации при проведении работ, при хранении путевой техники, при следовании к месту проведения работ и т.д. Изменение градиента этих состояний можно отметить так

$$\frac{dX}{dt}; \frac{dY}{dt}; \frac{dZ}{dt}. \quad (1)$$

Таким образом, фактическое состояние специального подвижного состава можно представить некоторым подмножеством X , существующим в n -мерном пространстве. В этом случае качество работы i -й путевой машины обозначим как $\mathcal{E}_i$, данная величина является функцией от вектора X и определяет множество его состояний A_m в m -мерном пространстве.

Функцию надежной работы $\varphi(x)$ можно представить как траекторию изменения технического состояния путевой машины в m -мерном пространстве (X, A_m) в котором каждое состояние машины является опре-

деленной величиной, имеющей равновесное значение и не имеющей флуктуаций вблизи его.

Решение задачи

Оценку функционирования системы использования специального подвижного состава предлагается провести с помощью упомянутого параметра надежности и анализа простоев путевой техники за 7 лет непрерывной эксплуатации, для этого используем результаты натурных исследований, представленные в табл. 1.

Для удобства проведения анализа и уменьшения влияния вторичных факторов, анализ простоев путевой техники также был проанализирован в рамках одной из отечественных железных дорог. Разница в выявленных простоях путевых машин на сети и на отдельной железной дороге связана с разным количеством путевой техники в регионах. Также необходимо отметить, что зачастую простои специального подвижного состава, связаны не только с техническим состоянием самих путевых машин, но и с отменой окон, перемещением к непосредственному месту проведения ремонтных работ, неполным штатным составом отдельных бригад, проведением различных работ по диагностике и ремонту машин, пусконаладочными работами и др.

В настоящей работе предполагается, что функция, отражающая надежную работу специального подвижного состава $\varphi(x)$ представляется через отказы, появляющиеся из-за ряда причин: резкое увеличение нагрузки, в том числе сверхнормативных значений; накопление микрповреждений и внутренних дефектов в элементах и агрегатах специального подвижного

Таблица 1

Причины простоев специального подвижного состава, входящего в механизированные комплексы

Тип СПС	Всего в % от рабочего сезона	В том числе:			
		Отмена окон	Транспортировка	Техобслуживание и неплановый ремонт	Прочие простои
СЧ 601	38	22	21	34	23
ЩОМ	49	20	24	44	12
РМ	42	34	20	28	18
Дуоматик	24	24	18	38	20
Унимат	21	26	24	31	19
ВПСР-03	31	19	29	40	12
ВПСР-02М	40	27	15	41	18
СЗП-600	37	25	29	36	10

Таблица 2

**Простои различных путевых машин на отдельной железной дороге
для 153 рабочих дней в году**

Тип СПС	Простои, дни	Простои, %
СЧ-600	102	67
DM-09-32, ПМА-1	50	33
Unimat	45	29
ДСП	66	43
ВПр-02М, ВПр-1200М, ВПр-02С	73	48
ВПрС-03, ВПрС-02М, ВПрС-02С	55	36
ВПр	78	51
ВПрС	96	63
ПБ	63	41

состава; увеличение трибологического износа; природные факторы; нарушения в области охраны труда и правил технической эксплуатации. Изменения в работоспособности путевых машин могут происходить и из-за характера появляющихся динамических усилий, таких как высокочастотные и гигацикловые нагружения.

Часть отказов элементов и агрегатов машин, которые непосредственно не приводят к отказу всего транспортного средства и могут быть устранены в плановом порядке в ходе проведения ремонтов или технического обслуживания, в данной модели предлагается не учитывать. Таким образом, за основную характеристику надежности принимаются отказы, которые ограничивают работоспособность всей машины и связаны с предельными состояниями ее отдельных систем. Фактически требуется определить вероятность $P_p(t)$ [2;3] наступления предельного состояния на базовом временном интервале $[0, T]$, связанном с определенными этапами жизненного цикла.

Причины появления простоев в относительных единицах измерения для конкретных типов путевой техники представлены в табл. 3.

В настоящем исследовании предложенная модель описания работоспособности путевой техники апробируется на примере работы хоппер-дозаторов, отказы которых чаще всего возникают из-за следующих причин: эксплуатационные отступления от норм при погрузке и выгрузке балластного материала; зарождение и развитие трещин в хребтовой и шкворневой балках; зарождение и развитие трещин в местах соединения основных элементов несущей конструкции; ускоренное корродирование узлов и элементов;

наличие технологических дефектов при изготовлении вагона; появление усталостных трещин в металле.

Из всего множества причин появления отказов требуется выделить те, которые связаны с управляемыми параметрами и могут оказать влияние на вероятность достижения требуемого состояния железнодорожного пути с заданной величиной ожидания. Такая задача относится к области теории массового обслуживания [6;7], на входе разработанного алгоритма формируется поток заявок на технического обслуживания, время выполнения каждой заявки при этом подчинено выбранному закону распределения с выбираемым параметром.

Пределы изменения функции бинарных состояний («нормальная работа» – «отказ») могут быть представлены в следующем виде:

$$0 \leq \varphi(x) < 1. \quad (2)$$

Состояние моделируемой системы описывается набором значений указанных выше переменных $C_c = \Phi[X_n^i, A_m^k \varphi^e]$, а изменения этих состояний могут быть представлены фазовой траекторией в первоначальном пространстве (X, A) . В качестве предельного состояния путевой техники предлагается принимать ресурс, связанный с нормативным сроком службы специального подвижного состава. Но поскольку, на жизненный цикл машин и механизмов оказывают влияние множество сложноформализуемых факторов, то логично предположить, что в процессе эксплуатации каждой единицы специального подвижного состава формируется индивидуальный ресурс, который является уникальным и, как правило, превышает нормативный срок службы. При этом

Таблица 3

Анализ причин простоев специального подвижного состава

Тип СПС	Простои, %								
	Отмена «окон»	Выходные дни	Транспортировка	Отсутствие бригад	Пусконаладочные работы	Техническое обслуживание	Ремонт плановый	Ремонт неплановый	Прочие причины
СЧ-600	36	5	12	0	2	6	2	4	33
DM-09-32, ПМА-1	16	2	22	0	4	12	8	12	24
Unimat	11	4	22	0	5	16	9	13	20
ДСП	15	3	19	2	2	11	3	14	31
ВПР-02М, ВПР-1200М, ВПР-02С	21	15	7	0	1	6	24	12	14
ВПРС-03, ВПРС-02М, ВПРС-02С	7	9	15	0	6	13	11	23	16
ВПР	10	25	9	3	5	9	6	15	18
ВПРС	10	28	6	6	4	7	12	14	13
ПБ	11	16	16	3	3	10	8	8	25

индивидуальный ресурс можно определить натурными испытаниями или численным моделированием и посредством управляющих воздействий оказывать влияние на жизненный цикл техники. Если за основу брать не путевую технику, а систему технического обслуживания железнодорожного пути, то надежность и работоспособность специального подвижного состава косвенно зависит от коэффициентов готовности K_r и технического использования $K_{ти}$:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^N i_{pi}}{NT_{раб}}, K_{ти} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{pi}}{NT_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где t_{pi} — суммарное время пребывания машин в работоспособном состоянии; T_{Σ} — общая продолжительность эксплуатации специального подвижного состава; $T_{раб}$ — продолжительность эксплуатации специального подвижного состава с учетом простоев из-за плановых ремонтов техники.

Таким образом, параметры износа и старения являются возмущающими факторами, изменяющими состояние специального подвижного состава, а в качестве управляющих факторов предлагается рассматривать систему технического обслуживания и ремонта специального подвижного состава [8]. Поскольку за весь жизненный цикл специальный подвижной состав может находиться в различных состояниях, то изменение этого состояния зависит от пространственно-

временных процессов и определяется в трехмерном пространстве набором координат X_0, Y_0, Z_0 . Учитывая важность интенсификации [9] использования дорогостоящей техники в системе технического обслуживания и ремонта железнодорожного пути требуется учитывать не только переходы между состояниями, но и скорость этих переходов, т.е. скорость процессов износа и старения. В силу сказанного рассматриваемое трехмерное пространство состоит из n точек, каждая из которых описывается тремя параметрами-координатами, т.е. фактически имеем следующие координаты X_k, Y_k, Z_k , где $k = 1, n$.

Согласно предлагаемой модели техническое состояние эксплуатируемого специального подвижного состава в любой момент времени определяется фазовой точкой $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, а на траекторию переходов между состояниями оказывает влияние управляющий параметр $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$. Изменение параметров U и X и дает понимание воздействия функции управления $U(t)$ на фазовую траекторию состояний $X(t)$. При этом, задавая вид функции управления $U(t)$ и начальное состояние $X_0 = X(t_0)$ для времени $t > t_0$ процесс изменения работоспособности можно считать полностью определенным.

Все фазовое пространство предлагаемой модели управления состоянием специального подвижного состава, предлагается разделить некой плоскостью $\Gamma(x)$, которая разделяет множество состояний на два

подмножества: исправные и неисправные, а вектор перехода между состояниями может изменяться при выполнении ремонтных работ, перемещая точку состояния из одного полупространства в другое (из неисправного в исправное). Положение траектории вектора и его приближение к плоскости $\Gamma(x)$ предлагается контролировать с помощью показателя γ , характеризующего состояние специального подвижного состава.

Если отсутствует резкое появление критических дефектов, например, таких как трещина в несущем элементе вагона, то траектория изменения состояний меняется плавно, постепенно приближаясь к границе двух полупространств. Активация управляющего воздействия U_1 позволит предотвратить попадание траектории изменений состояний в полупространство отказов. Если говорить про техническое обслуживание техники через определенное время или наработку, то управляющие воздействия U_2 можно оказывать в определенные моменты времени с частотой Δt . Если, все же, траектория вектора состояния попадет в зону отказов, то требуется проводить ремонт или модернизацию, т.е. оказывать управляющее воздействие третьего типа U_3 , которое представляет собой интенсивное восстановление специального подвижного состава. С учетом, возможных управляющих воздействий, уравнение управления состоянием специального подвижного состава в процессе эксплуатации U_Σ можно представить в следующем виде:

$$U_\Sigma = U_1(t) + \sum_1^n U_2(\Delta t_i) + \sum_1^k U_3(\Delta t_j), \quad (4)$$

где i, j — дискретные величины, определяющие моменты оказания управляющих воздействий; Δt — временные интервалы.

Сам процесс изменения состояния специального подвижного состава может быть представлен системой определяющих дифференциальных уравнений:

$$\frac{dX_n}{dt} = F(X, Y, U). \quad (5)$$

Если принять, что величины Y_0 являются нормальными условиями эксплуатации путевой техники, а величина U_0 , есть управляющее воздействие для достижения этих условий, то следующее уравнение описывает процесс изменения невозмущенного (нулевого) состояния:

$$\frac{dX_n}{dt} = I, \quad (6)$$

где $I = f(Y_0, U_0)$.

Уравнение (6) в базисе метрики с параметрами γ_i можно представить в следующем виде:

$$\frac{dX_i}{dt} = \gamma_i, i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

Особенности технического обслуживания путевой техники требуют учета малых отклонений в условиях ΔY и ΔU , которые изменяют первоначальные значения Y_0 и U_0 , в этом случае нужно использовать выражение:

$$\frac{d\Delta X_i}{dt} = k_0 \Delta X + K_1 \Delta Y + K_2 \Delta U, \quad (8)$$

где $K_1 = \sum \frac{df_i}{dU_j}$ — изменение (вектор) строки значений Y ;

$K_2 = \sum \frac{df_i}{dU_j}$ — изменение (вектор) строки значений U ;

$\Delta Y = \begin{pmatrix} \Delta Y_1 \\ \Delta Y_2 \\ \dots \\ \Delta Y_n \end{pmatrix}$ — дискретный интервал (вектор) столбца значений Y ;

ΔU — дискретный интервал (вектор) столбца значений U .

Предложенные соотношения для управления индивидуальным ресурсом специального подвижного состава, который рассматривается в качестве элемента системы технического обслуживания железнодорожного пути, позволяют учесть различные способы воздействия управляющих факторов, технологические процессы проведения путевых работ, повышение скорости перемещения путевой техники при выполнении работ, а также увеличение их грузоподъемности. Если рассматривать отдельно влияние двух факторов, то можно отметить, что повышение выработки (увеличение скорости) ограничивается динамикой изменения положения пути, а увеличение грузоподъемности приводит к существенным градиентам в изменении напряжений в элементах верхнего строения железнодорожного пути [10–12]. Таким образом, в работе путевой техники находят отражения общемировые тенденции строительства отдельных путей для высокоскоростного и обычного подвижного состава.

Предложенная модель позволяет учитывать различные элементы функционирования системы технического обслуживания специального подвижного состава, например, при преобладании определенных дефектов пути или особенностей в предоставлении «окон».

Проведенный анализ эксплуатации специального подвижного состава в различных условиях для одного типа путевых машин можно достаточно просто масштабировать на весь класс машин, в соответствии с применяемой технологией путевых работ. При этом можно использовать только две характеристики: $t_{ожм}$ — простой специального подвижного состава и $t_{ожп}$ — ожидание начала проведения ремонтных работ. В этом случае функция управления сводится к уменьшению временного фактора $t_{ожп}$, при условии неперевышения нормативных значений фактором $t_{ожп}$. Такой подход позволяет определить оптимальное количество путевой техники в машинных комплексах и выполнять основные требования к качеству обслуживания специального подвижного состава.

Заключение

Предложенная функциональная модель позволила повысить уровень безопасной эксплуатации специального подвижного состава, разработать требования для формализации процесса технического обслуживания путевых машин, определить основные характеристики процессов обслуживания специального подвижного состава, включающая поток требований различного уровня и векторов оптимизации эксплуатируемых машин специального подвижного состава, в целом, это позволит снизить уровень травматизма при реализации различных технологических процессов для путевых работ. 

Литература

1. Сычев, В.П. Обеспечение безопасности труда при производстве путевых работ на основе автоматизации процессов выгрузки и укладки балласта в железнодорожный путь / В.П. Сычев, В.А. Аксенов, Н.Г. Шабалин, Е.А. Сорокина, П.В. Сычев. — Текст: непосредственный // Безопасность жизнедеятельности. — 2020. — № 9(327). — С. 24–29.
2. Сычев, П.В. Диагностика специального подвижного состава на основе применения закона распределения экстремальных значений / П.В. Сычев. — Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. — 2018. — № 5. — С. 27–30.
3. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения = Dependability in technics. Terms and definitions: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июня 2016 г. № 654-ст: дата введения 2017-03-01 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «Институт надежности машин и технологий» (ООО «ИНМиТ»). — Москва: Стандартинформ, 2017. — 30 с. — Текст: непосредственный.
4. Сычев, В.П. Продление срока службы специального подвижного состава / В.П. Сычев. — Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. — 2009. — № 8. — С. 16.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. — 9-е изд., стер. — Москва: Высшая школа, 2003. — 479 с. — ISBN 5-06-004214-6. — Текст: непосредственный.
6. Матвеев, В.Ф. Системы массового обслуживания: Учебное пособие для вузов по специальности «Прикладная математика» / В.Ф. Матвеев, В.Г. Ушаков. — Москва: Издательство Московского университета, 1984. — 238 с. — Текст: непосредственный.
7. Loktev A.A., Sycheva A.V., Vershinin V.V. Modeling of Work of a Railway Track at the Dynamic Effects of a Wheel Pair. Proceeding of the 2014. International Conference on Theoretical Mechanics and Applied Mechanics, Venice, Italy, March 15–17, 2014. P. 32–35.
8. Путевые машины: учебник / А.Ю. Абдурашитов, А.В. Атаманюк, В.Б. Бредюк, В.М. Бугаенко, А.П. Вецель, Б.Г. Волковойнов, М.А. Володин, Ю.А. Гамоля, Р.В. Грачев, Г.В. Завгородний, В.В. Карпик, А.С. Клементов, В.Ф. Ковальский, И.А. Мазунов, С.В. Петуховский, М.В. Попович, С.Л. Скрипка, Р.Д. Сухих, В.П. Сычев, В.М. Хавин; под ред. М.В. Попович, В.М. Бугаенко. — Москва: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. — 960 с. — ISBN 978-5-907055-69-8. — Текст: непосредственный.

9. Абдурашитов, А.Ю. Оценка остаточного ресурса объектов инфраструктуры на основе анализа динамики изменения технического состояния в процессе эксплуатации / А.Ю. Абдурашитов, П.В. Сычев. — Текст: непосредственный // Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских железных дорогах. Сборник трудов ученых АО «ВНИИЖТ» (АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»). — Москва, 2017. — С. 60–67.
10. Сычева, А.В. Расчет осадки полотна железнодорожного пути от действия динамической нагрузки с помощью лучевого метода / А.В. Сычева, А.А. Локтев, А.В. Залетдинов. — Текст: непосредственный // Нелинейный мир. — 2013. — № 11. — С. 67–76.
11. Loktev A, Sychev V., Gridasova E. and Stepanov R. Mathematical Modeling of Railway Track Structure under Changing Rigidity Parameters // Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. V.1. Theoretical and Applied Mathematics. — 2017. — С. 291–307.
12. Сычева, А.В. Исследование динамических характеристик верхнего строения железнодорожного пути при динамическом воздействии / А.В. Сычева, А.А. Локтев. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 4. — С. 64–70.