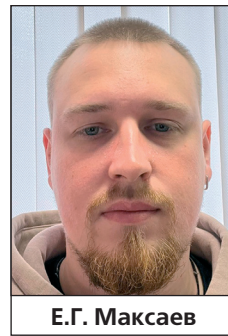


МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА ОТКАЗОВ УЗЛОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И РЕМОНТА

В статье рассматриваются особенности анализа отказов узлов локомотива для оценки их технического состояния и ремонта. Описан подход, основанный на методе анализа режимов и последствий отказов с целью выявления и оценки потенциальных рисков, связанных с отказом компонентов подвижного состава. Прикладные особенности метода рассмотрены на примере отказа тормозной системы локомотива.

Ключевые слова: подвижной состав, тормоза, анализ, отказ, риск

EDN: HQCTEG



Е.Г. Максаев



Д.Н. Шевченко

Сектор железнодорожного транспорта является ключевым фактором экономического роста во всем мире. Количество пассажиров железной дороги, а также объемы грузовых перевозок значительно возросли за последние годы. Например, в России по результатам 2023 г. объем железнодорожных грузоперевозок достиг отметки 1,51 млрд т, что на 0,4% больше по сравнению с предыдущим годом [1]. В США перевозки грузов железнодорожным транспортом растут стабильными темпами, начиная с 2016 г., достигнув 2,53 трлн тонно-километров в 2018 г. В 2023 г. этот показатель продемонстрировал очередной рекорд, который был зафиксирован на уровне 2,64 трлн тонно-километров. В Европе после преодоления кризиса, вызванного пандемией COVID-19, сектор железнодорожного транспорта восстановился, о чем свидетельствуют следующие статистические данные: объемы грузовых перевозок увеличились на 0,5% в 2022 г. по сравнению с 2021 г.

В 2023 г. рост продолжился (4,9%), достигнув 378 млрд тонно-километров [2].

С учетом повышенного спроса к производительности железнодорожного транспорта актуальными становятся задачи выполнять больше операций за менее короткий срок с наименьшими затратами ресурсов. Это означает, что необходимое для перевозок оборудование должно иметь повышенную готовность, что является прямым следствием его высокой надежности. Для достижения этих целей необходимо, чтобы техническое обслуживание перешло из категории реактивного и заняло более проактивную позицию. Сосредоточившись на постоянном улучшении процессов транспортировки и, главным образом, на глубоком анализе оборудования, инструментом в этом сценарии является анализ отказов, основная цель которого заключается в быстром выявлении первопричины отказа, предоставлении качественных инструментов и объективизации блокады первопричины [3].

Максаев Евгений Геннадьевич, ассистент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: тяговый электропривод, коэффициент сцепления колеса с рельсом, боксование, противобоксовочные защиты; механическая часть подвижного состава. Автор одной научной работы.

Шевченко Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: тяговый электропривод, коэффициент сцепления колеса с рельсом, боксование, противобоксовочные защиты; механическая часть подвижного состава. Автор 62 научных работ, в том числе двух монографий. Имеет 44 патента РФ.

Железнодорожные активы в целом можно разделить на два типа: первый — это инфраструктура, которая состоит из основных средств, таких как пути, пункты и блокировки, мосты, система сигнализации, электрические устройства и т.д. Второй — подвижной состав, который включает в себя активы, способные перемещаться по железной дороге, например, локомотивы, пассажирские вагоны, грузовые вагоны. Подвижной состав — это многокомпонентная система, состоящая из колес, тележек, кузова и рамы, силовой установки, блока управления тормозами, сцепного устройства, компрессора, пантографа и т.д.

В последние годы большое внимание уделялось изучению механизмов отказов/повреждений для объектов железнодорожной инфраструктуры. Однако в имеющихся публикациях можно отметить наличие дефицита моделей, которые могут использоваться для оценки критичности отказов компонентов подвижного состава. Необходимость продолжения исследований в данном направлении и предопределило выбор темы данной статьи.

Потенциальные риски непредвиденных отказов, возникающих в подвижном составе, рассматривают в своих трудах Файзибаев Ш.С., Авдеева А.Н., Мамаев Ш.И., Yingchun Shi, Chunyang Chen, Yu Luo, Lijun Zhou.

Различные неисправности тормозного подвеса тележки локомотива и анализ первопричины отказа тормозов изучают Грищенко А.В., Хамидов О.Р., Железняк В.Н., Jianhua Liu, Linfan Liu, Jing He, Changfan Zhang.

Над усовершенствованием системы управления техническим состоянием локомотивного парка с целью поддержания уровня его технического состояния, что соответствует безопасности и рациональности эксплуатации тяговых, единиц трудятся Савоськин А.Н., Лавлинская Н.С., Иванов П.Ю., Kevin S. Amidon, Jing Lin, Matthias Asplund, Aditya Parida.

Высоко оценивая имеющиеся на сегодняшний день труды и наработки, следует отметить, что ряд проблемных вопросов требует более детального анализа. Так, в уточнении и дальнейшем развитии нуждается методология обслуживания, ориентированного на надежность, для анализа отказов активов железнодорожной инфраструктуры. Кроме того, нерешенной остается проблема оценки критичности отказов компонентов железнодорожного подвижного состава и анализа их последующего воздействия на инфраструктурные активы.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей анализа отказов узлов железнодорожного подвижного состава в действующих системах для оценки их технического состояния и ремонта.

В последнее десятилетие было проведено множество исследований, направленных на анализ вероятности отказа железнодорожных активов, а также определения влияния поломок на работу транспорта. Для этого использовались различные инструменты и методы оценки рисков, включая анализ первопричин (RCA), анализ дерева неисправностей (FTA), анализ дерева событий (ETA), анализ Вейбулла, оценку надежности человека и т.д. [4].

В момент эксплуатации на подвижной состав влияют факторы, стремящиеся снизить уровень его технического состояния:

1. Внешние условия эксплуатации — температура, влажность, профиль пути и его состояние и т.д.

2. Внутренние условия эксплуатации — человеческий фактор, физическая природа рабочего процесса.

Данные факторы изменяют процесс равномерного расходования ресурса, который предусмотрен нормами пробега до обслуживания и ремонта, что приводит к возникновению риска отказа (непланового ремонта) при реализации перевозочного процесса. Одна деталь железнодорожного подвижного состава может выйти из строя по десяткам причин. Группа деталей или система, например, система подачи воздуха, может выйти из строя по сотням причин. Для локомотивов их число может исчисляться тысячами [5]. Большинство работников технических служб содрогаются при мысли о времени и усилиях, которые придется затратить на выявление всех этих способов отказа. Многие из них решают, что такой анализ — это слишком много работы и полностью отказываются от этой идеи. При этом упускается из виду тот факт, что на повседневной основе техническое обслуживание действительно управляется на уровне режимов отказов. С другой стороны, проактивное управление означает реагирование на события до их возникновения. Для этого нам необходимо заранее знать, какие события могут произойти. В данном контексте «события» — это режимы отказов. Таким образом, в рамках проводимого исследования представляется целесообразным использовать метод анализа режимов и последствий отказов (FMEA).

FMEA — это проактивный метод, который выявляет потенциальные сбои в сложных процессах и обеспечивает основу для непрерывного совершенствования. Он широко признан как эффективная программа для управления рисками и предотвращения ошибок в различных областях, включая информатику и инженерное дело, транспорт и энергетику. FMEA состоит из семи этапов: создание команды, анализ текущего рабочего процесса, анализ скрытых отказов и их последствий, оценка выявляемости неисправности, расчет числа

приоритетов риска (RPN) и оценка результатов, реализация корректирующих действий, отслеживание контрмер и измерение результатов. Chang Liu и Shiwu Yang определили FMEA как полуколичественный инструмент, поскольку он предполагает сбор как качественных, так и количественных данных [6].

В табл. 1 представлен стандартный шаблон FMEA.

С учетом вышеизложенного, на рис. 1 представлена разработанная авторами методология оценки риска отказов подвижного состава, которая включает девять этапов.

Итак, для того чтобы выбрать компонент подвижного состава для исследования, рассмотрим среднее время до отказа и среднее время между опасными отказами для отдельных систем и элементов локомотива 3ЭС8, влияющих на безопасность железнодорожного транспорта (табл. 2).

В рамках проводимого исследования рассмотрим более подробно тормозную систему подвижного состава.

Во время торможения тормозная балка с обеих сторон колесной пары перемещается тормозным цилиндром через тормозную оснастку таким образом, что держатели тормозных колодок притягиваются к поверхности катания колес. Однако тормозная балка управляет перемещением тормозных колодок только в горизонтальной плоскости и не обеспечивает вертикального удержания. Верхняя часть тормозных подвесок соединена с кронштейнами на раме тележки при помощи верхних тормозных подвесок [7].

Согласно табл. 2, наибольшее количество отказов приходится на возникновение нарушений в работе регулирующего клапана. Для расчета значения RPN нескольких типов отказов будут оценены серьезность: частота возникновения и уровень обнаружения (см. табл. 3).

Из табл. 3 видно, что наиболее потенциальными причинами, которые могут вызвать помехи в работе тормозной системы поезда, являются отказ регулирующей арматуры, износ тормозных механизмов и коррозия компонентов тормозной системы. С использованием диаграммы Фишбона можно более глубоко определить первопричины рискованных событий с самыми высокими значениями RPN.

Диаграмма Фишбона применяется в качестве более прогрессивного метода графического представления, который позволяет выявлять, изучать и проводить анализ источников проблем тормозной системы подвижного состава с целью выработки предложений по улучшению его технического обслуживания. Приведенная на рис. 3 диаграмма иллюстрирует отказ тормозной системы в секции регулирующего клапана, где действуют четыре существенных фактора: факторы двигателя, оператора или механика, используемые методы ремонта и факторы окружающей среды.

Таблица 1

Стандартная форма FMEA

Подсистема или процесс	Потенциальный отказ	Тяжесть	Потенциальная причина или механизм неисправности	Вероятность возникновения	Обнаружение	Рейтинг приоритетности риска (RPN)	Рекомендация
Часть системы или процесс	Как может произойти отказ подсистемы	Шкала от 1 до 10	Механизм отказа	Шкала от 1 до 10	Шкала от 1 до 10	$RPN = \text{Тяжесть (S)} \times \text{Частоту (O)} \times \text{Обнаруживаемость (D)}$	Предложение по смягчению последствий отказа

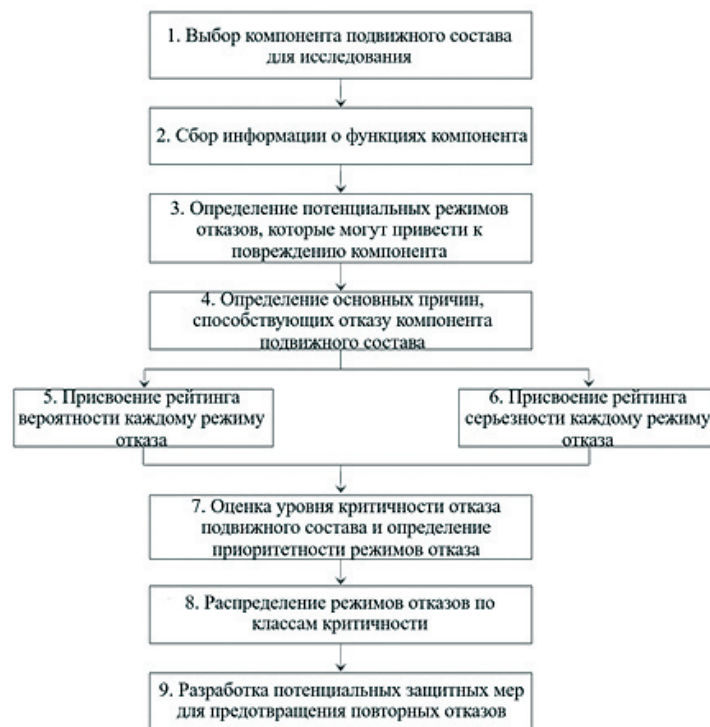


Рис. 1. Методология оценки риска отказов железнодорожного подвижного состава, разработанная на основе FMEA

Таблица 2

**Среднее время наработки на отказ и время между опасными отказами
для отдельных систем и элементов**

№ п/п	Описание	Среднее время между опасными отказами (часы)	Среднее расстояние между опасными отказами (км)
1	Ходовая часть	27,506.3	178,200.0
1.1	• неисправности и износ поверхности катания колес	27,506.3	178,200.0
2	Тормозная система (пневматическая и механическая части)	6,430.0	41,657.1
2.1	• поломка воздухораспределителя	18,337.5	118,800.0
2.2	• повреждение пневматических рукавов	165,037.5	1,069,200.0
2.3	• неисправности магистрального трубопровода	29,124.3	188,682.4
2.4	• поломка предохранительной арматуры	41,259.4	267,300.0
2.5	• неисправности тормозных цилиндров	247 556.3	1,603,800.0
2.6	• повреждение рычажной передачи	38,139.5	255,241.0
2.7	• повреждения электропневматической системы	49,511.3	320,760.0
2.8	• утечки воздуха	82,518.8	534,600.0
3	Инженерные устройства управления безопасностью движения поезда	8,841.3	57,278.6
3.1	• неисправности устройств управления безопасностью движения, измерительных приборов или систем безопасности	8,841.3	57,278.6

а



б

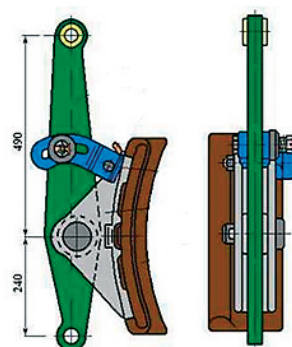


Рис. 2. Тормозная система локомотива: а – подвеска тормоза в сборе;
б – крепление башмака с тормозной колодкой к подвеске

Таблица 3

Расчет RPN

Потенциальный режим отказа	Потенциальная причина отказа	Потенциальный эффект от сбоя	S	O	D	RPN	Рейтинг
Отказ тормозной системы	Поломка регулирующего клапана / распределительного клапана	Тормозной блок заклинило/тормозная система не работает/ Утечка	8	10	9	720	1
	Пневматический рукав	Утечка воздуха или ослабление крепления	7	6	8	336	4
	Тормозная магистраль	Утечка воздуха в тормозной магистрали	7	6	6	252	5
	Запорная арматура	Утечка разобщительного крана или стоп-крана	4	2	3	24	7
	Неисправности привода тормозной системы	Невозможность отпустить тормоза поезда	7	5	6	210	6
	Тормозные колодки	Износ или заклинивание тормозной рычажной передачи	4	1	2	8	8
	Электропневматическая система	Отказ тормозной системы	7	8	8	448	2
	Утечка воздуха	Коррозия компонентов тормозной системы, повреждение или износ резино-технических изделий	6	9	8	432	3

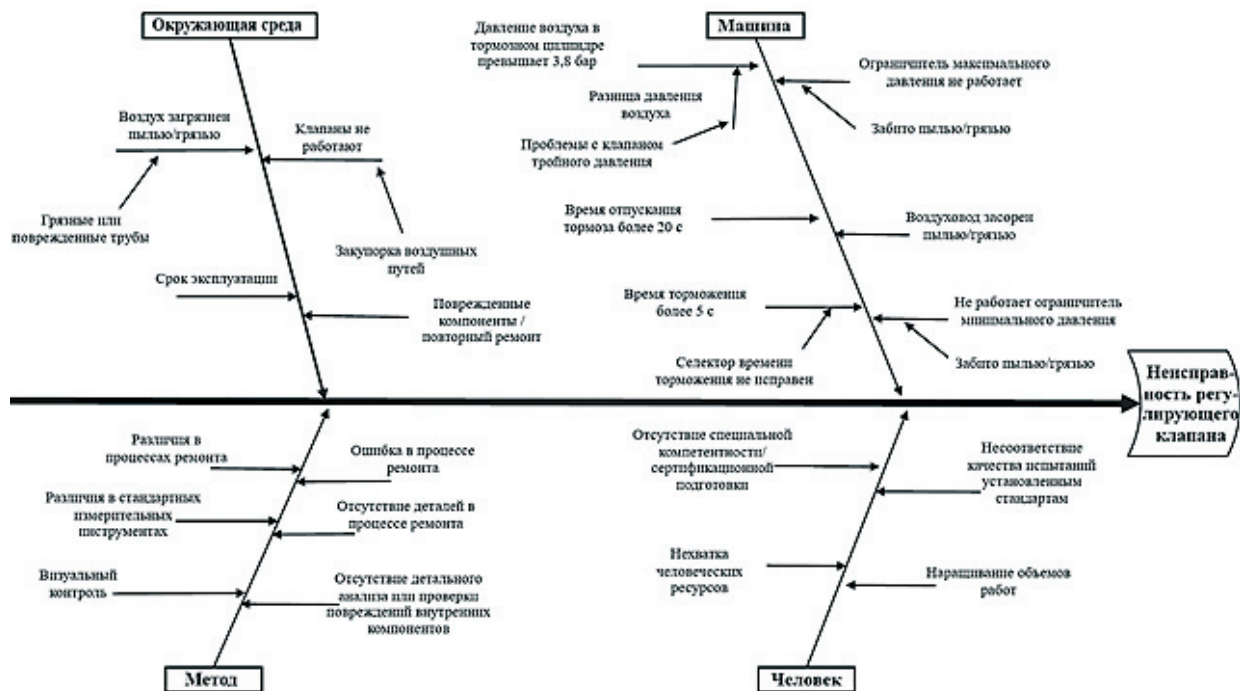


Рис. 3. Диаграмма Фишбона для отказа тормозной системы поезда в секции регулирующего клапана

Таким образом, подводя итоги проведенного исследования, отметим, что в статье описан подход, основанный на методе анализа режимов и последствий отказов, для выявления и оценки потенциальных рисков, связанных с выходом из строя компонентов подвижного состава. Прикладные особенности метода рассмотрены на примере отказа тормозной системы локомотива.



Литература

1. Пляскин, А. К. Ситуационный анализ безотказности локомотивов на Дальневосточной железной дороге / А. К. Пляскин, В. А. Бутусова, А. С. Кушнирук. - Текст : непосредственный // Техник транспорта: образование и практика. - 2023. - Т. 4, № 2. - С. 215-218.
2. Diana Sofia Mendoza, Javier Solano Energy management strategy to optimise regenerative braking in a hybrid dual-mode locomotive // IET Electrical Systems in Transportation. - 2023. - Volume 10, Issue 4. - P. 34-39.
3. Mingming Zhang Locomotive Gear Fault Diagnosis Based on Wavelet Bispectrum of Motor Current // Shock and Vibration. - 2021. - № 1. - P. 61-67.
4. Кручек, В. А. Диагностика технического состояния подшипников качения асинхронных тяговых двигателей локомотивов на основе интеллектуального анализа данных / В. А. Кручек. - Текст : непосредственный // Электротехника. - 2020. - № 1. - С. 2-5.
5. Пляскин, А. К. Оптимизация норм межремонтных пробегов электровозов серии 2(3,4)ЭС5К на основе отказов тяговых электродвигателей / А. К. Пляскин. - Текст : непосредственный // Известия Транссиба. - 2022. - № 3 (51). - С. 35-43.
6. Chang Liu, Shiwu Yang Research on radiated interference from diesel locomotive traction motor to cab signaling // IET Electrical Systems in Transportation. - 2022. - Volume 12, Issue 3. - P. 109-114.
7. Федотов, М. В. О предрейсовом контроле локомотивов с использованием интеллектуального анализа данных / М. В. Федотов. - Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. - 2023. - № 6. - С. 25-29.