

Процесс обеспечения надежности локомотивов, проектируемых под современные технические требования



Ю. И. Клименко,
канд. техн. наук, зав.
научно-исследовательским
конструкторским бюро
по электрооборудованию
и микропроцессорным
системам управления
АО «Научно-исследова-
тельский и конструкторско-
технологический
институт подвижного
состава» (АО «ВНИКТИ»)



Е. Е. Белова,
канд. техн. наук,
зав. лабораторией
надежности
АО «ВНИКТИ»



М. И. Потапов,
научный сотрудник
АО «ВНИКТИ»



В. П. Толстов,
канд. техн. наук,
генеральный директор
ООО «Центр инновацион-
ного развития “Синара —
Транспортные машины”»
(ООО «ЦИР СТМ»)



П. С. Шаламов,
начальник отдела
надежности
ООО «ЦИР СТМ»

В статье рассмотрен пример реализации процесса обеспечения надежности, учитывающий современные технические требования, предъявляемые к проектированию локомотивов. Процесс обеспечения надежности представлен в виде последовательно решаемых подзадач в конкретной реализации на примере тепловоза 2ТЭ35А.

Несоответствие локомотивов требованиям в части надежности приводит к негативным последствиям: потере доверия потребителя к локомотивам, которые разрабатываются и выпускаются предприятием; снижению их конкурентоспособности на рынке; увеличению стоимости владения локомотивами; необходимости их постоянной модернизации в части конструкции и технологии изготовления. Процесс обеспечения надежности локомотивов в течение жизненного цикла (ЖЦ) направлен на исключение риска несоответствия локомотивов требованиям, что делает его базовым при разработке современного локомотива. Далее в статье процесс обеспечения надежности представлен на примере конкретной реализации применительно к тепловозу 2ТЭ35А, проектируемому ООО «ЦИР СТМ», с перспективой охвата всех стадий его ЖЦ.

Выстраивание процесса обеспечения надежности тепловоза 2ТЭ35А в течение ЖЦ базировалось на нижеследующих документах. Основные характеристики нового локомотива изложены в технических требованиях (ТТ) к магистральным грузовым автономным локомотивам для Восточного полигона, утвержденных 29 декабря 2018 г. заместителем генерального директора — главным инженером ОАО «РЖД» С. А. Кобзевым [1]. ГОСТ 27.003-2016 «Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности» [2] использован как основной нормативный документ, который определил состав и общие правила задания требований надежности на тепловоз 2ТЭ35А при разработке ТЗ.

Как альтернатива декларативному способу нормирования надежности локомотивов, применяемому в настоящее время в локомотивостроении, использована четырехуровневая стратегия процесса нормирования и контроля требований надежности локомотивов, принятая в ОАО «РЖД». Стратегия представлена на рис. 1 и определена следующими уровнями:

1. Целевой. Формируется на стадии «определение требований» и включается в ТТ.

2. Требуемый. Определяется на стадии «разработка» и включается в ТЗ.

3. Нормативный. Определяется на стадии «разработка» и включается в ТУ.

4. Эксплуатационный. Определяется на стадии «разработка» и включается в соглашение об уровне обслуживания (Service Level Agreement, SLA) по итогам эксплуатации установочной партии локомотивов в условиях конкретного полигона (SLA — неотъемлемая часть контракта ЖЦ) [3, 4].

Таким образом, в ходе разработки ТЗ для 2ТЭ35А в части надежности решались задачи обеспечения «абсолютной» безотказности основных и наиболее ответственных узлов тепловоза, снижения до минимума вероятности отказов других систем, уменьшения продолжительности простоев, связанных с поиском и устранением неисправностей оборудования тепловоза. Для характеристики и выстраивания процесса обеспечения надежности тепловоза должно быть использовано минимально возможное количество нормируемых показателей; все эти показатели должны иметь однозначное и четкое истолкование; значения показателей должны допускать расчетную оценку на стадии проектирования и достоверную

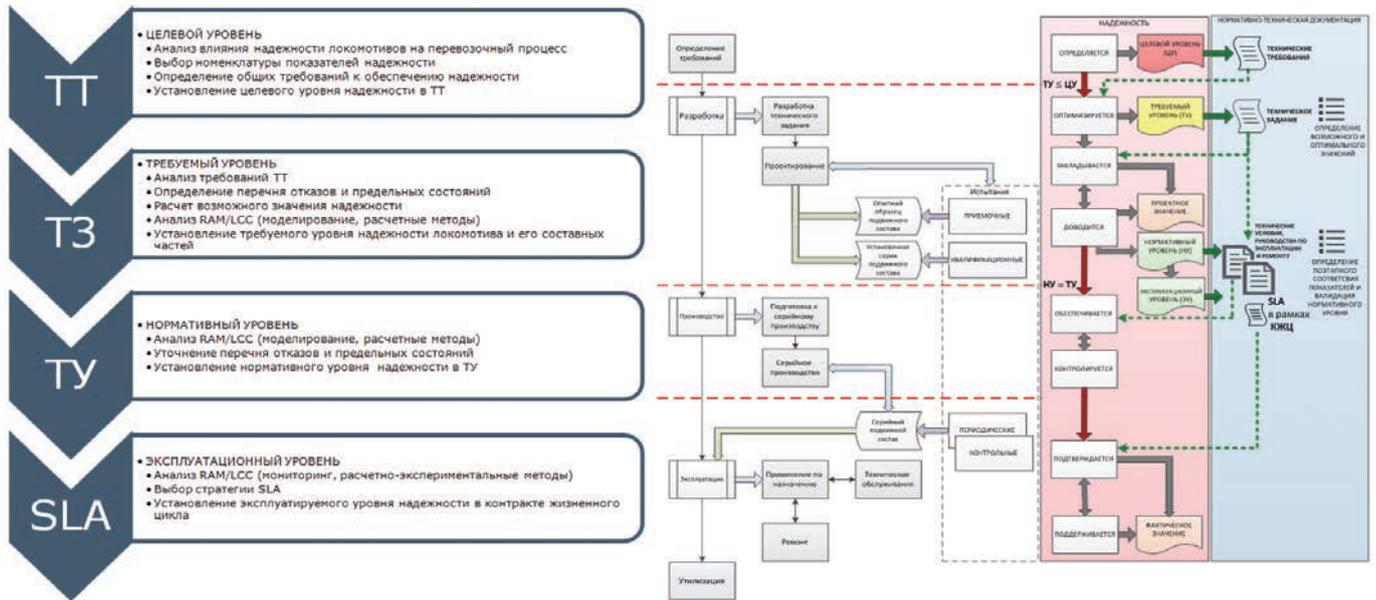


Рис. 1. Процессная модель нормирования и контроля требований надежности локомотивов [3]

экспериментальную оценку (точечную и интервальную) при испытаниях и/или на стадии эксплуатации. Решение названных задач с обязательной реализацией отмеченных условий выполнялось в несколько этапов, полученные результаты позволили сформировать основные положения ТЗ тепловоза 2ТЭ35А в части надежности.

Анализ назначения локомотива, условий и режимов его технической эксплуатации

Анализ проводился для выявления всех вариантов последствий потери локомотивом работоспособности и выбора доминирующих свойств надежности.

Согласно правилам [5] и ГОСТ 34056-2017 «Транспорт железнодорожный. Состав подвижной. Термины и определения» [6] локомотив является отдельным объектом железнодорожного тягового подвижного состава, который предназначен для обеспечения передвижения по железнодорожным путям поездов и отдельных вагонов. Возможны различные классификации локомотивов, базирующиеся на разных группировочных признаках. Например, по ГОСТ 27.003-2016 [2] в общем случае локомотив можно охарактеризовать как сложный многофункциональный технический объект, который может находиться в нескольких частично работоспособных состояниях, не считая работоспособного и неработоспособного. При этом локомотив имеет конкретное назначение, и в зависимости от обстоятельств его применение может быть как непрерывным длительным (экономически предпочтительно для потребителя), так и многократным циклическим. Кроме

того, локомотив в своем составе имеет компоненты вычислительной техники и контролируется перед применением, он — восстанавливаемый, стареющий и изнашиваемый одновременно, обслуживается и ремонтируется необезличенным способом, его отказы или переходы в предельное состояние приводят к последствиям катастрофического или критического характера.

Модель эксплуатации нового локомотива в условиях Восточного полигона полностью определена в ТТ. Наиболее важные для последующего изложения аспекты этой модели:

- назначение — для перевозки грузовых составов с расчетной массой 7 100 т и с максимальной допускаемой скоростью движения 120 км/ч;
- область применения — на сети железных дорог ОАО «РЖД», прежде всего на неэлектрифицированных участках (в частности, на основном предполагаемом тяговом плече Таксимо — Советская Гавань протяженностью около 3 000 км Восточного полигона);
- локомотив управляется бригадой, работающей посменно (среднее время работы бригады — 8,61 часа);
- перечень недопустимых дефектов в эксплуатации приведен в [5] (п. 14, 21, 24 приложения № 5).

Анализ назначения локомотива, условий и режимов его технической эксплуатации показал, что доминирующие свойства надежности локомотива — безотказность и долговечность, которые должны обеспечивать реализацию основных функций (запуск, холостой ход, тяга, торможение) для решения задачи по пере-

мещению груза в режиме магистрального движения. Свойство ремонтпригодности обеспечивает реализацию требуемой готовности локомотивов при поддержании необходимых уровней его долговечности и безотказности.

Обоснование критериев оценки надежности локомотива по доминирующим последствиям потери работоспособности

Обоснование выполнялось для формулирования цели управления надежностью локомотивов и последующего определения и выбора критериев его отказов и предельных состояний.

Локомотив — это сложная техническая система, представляющая собой совокупность элементов, объединенных конструкционно и функционально для выполнения некоторого набора требуемых функций. По значимости для потребителя требуемые функции локомотива делятся на основные (в том числе функция безопасности и функция, обеспечивающая несущую способность конструкции), вспомогательные и дополнительные. В целом элементы локомотива согласно ГОСТ Р 57445-2017 «Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса» [7] можно разделить на два основных подмножества — базовые и некритические. Исходя из этой классификации функций и элементов локомотивов, а также классифицирования последствий отказов и предельных состояний на катастрофические (вред человеку, окружающей среде, транспортной системе), критические (вред перевозочному процессу) и некритические

Табл. 1. Структурно-функциональная целостность локомотива

№	Наименование систем локомотива
1	Системы обеспечения торможения и оборудование
2	Системы управления, регулирования, диагностики и защиты
3	Энергосиловая установка
4	Вспомогательные системы и устройства
5	Системы передачи мощности
6	Системы обеспечения бортового энергоснабжения
7	Системы безопасности движения и оборудование
8	Кузов и рамная/несущая конструкция
9	Экипаж и устройства передачи тягового усилия

(все остальные), иерархия предельных состояний и отказов будет выглядеть так:

1. События предельных состояний локомотива имеют последствия катастрофического характера. Критерии предельных состояний локомотива определяются дефектами базовых элементов, приводящими к отказам этих элементов.

2. События отказов и повреждений локомотива имеют последствия критического характера. Критерии отказов определяются дефектами базовых элементов, приводящими к повреждениям локомотива, и дефектами некритических элементов, приводящими к отказам локомотива.

3. События отказов и повреждений локомотива имеют последствия некритического характера. Дефекты вспомогательных элементов приводят к повреждениям локомотива.

Такая структуризация элементов, событий и последствий позволила классифицировать зафиксированные в положениях ТЗ отказы локомотива по критичности в зависимости от места их обнаружения и последствий для перевозочного процесса:

- отказ первого вида обусловлен дефектами, обнаруженными в рабочем состоянии локомотива, при этом его дальнейшая эксплуатация недопустима, для восстановления перевозочного процесса используется вспомогательный локомотив;
- отказ второго вида обусловлен дефектами, обнаруженными в рабочем состоянии локомотива, при этом дальнейшая эксплуатация недопустима, восстановление перевозочного процесса осуществляется ограниченным использованием неисправного локомотива за счет применения резервных схем функционирования локомотива со снижением его эффективности;
- отказ третьего вида обусловлен дефектами, обнаруженными в нерабо-

чем состоянии, во время проведения планового технического обслуживания (дефекты локомотива, обнаруженные на плановых видах ремонта, не являются отказом третьего вида);

- отказ четвертого вида обусловлен дефектами оборудования, которое обеспечивает санитарно-гигиенические условия работы локомотивной бригады, учет расхода топлива, не участвует в выполнении основных функций локомотива и не входит в перечень недопустимых в эксплуатации [8, 9].

Остальные дефекты оборудования, являющиеся причинами повреждений локомотива при сохранении его работоспособного состояния, не классифицируются, при необходимости учитываются отдельно.

Установление связи между критериями оценки надежности локомотива и его конструктивными и технологическими особенностями

Установление связи между критериями оценки надежности локомотива и его конструктивными и технологическими особенностями должно определить влияние потери работоспособности на эффективность функционирования локомотива, чтобы выбрать основные пути обеспечения надежности проектируемого локомотива. Ключевой метод реализации работ — моделирование. Модель локомотива в этом случае представляет его структуру и отношения в ней.

Локомотив делится на девять полнофункциональных систем, образующих его структурно-функциональную целостность (СФЦ) (табл. 1). Каждая из этих систем выполняет собственную подфункцию и включает в себя полный набор фактических элементов для ее выполнения.

Предельные состояния элементов систем № 1, 8, 9 имеют последствия катастрофического характера, а значит, необходимо обеспечение повышенных

требований их надежности: например, вероятность безотказной работы (ВБР) должна быть на уровне 0,999...1. К базовым конструкционным элементам, отказы которых имеют последствия критического характера, относятся элементы систем № 3 и 7, ВБР таких элементов должна удовлетворять диапазону 0,990...0,999. В целом элементы вышеперечисленных систем относятся к множеству базовых.

Отказы элементов остальных систем локомотива имеют последствия критического и некритического характера. При этом системы включают в себя элементы множества некритических последствий. Для данной группы могут действовать менее жесткие требования: например, ВБР должна обеспечиваться на уровне 0,95...0,99. Для всех остальных элементов ВБР должна быть 0,80...0,95. ВБР менее 0,8 целесообразно устанавливать для элементов, дефекты которых приводят только к повреждению локомотива при сохранении его работоспособного состояния.

Дальнейшее развитие СФЦ локомотива с учетом логики реализации его требуемых основных функций позволило получить универсальную логико-вероятностную модель структурно-функциональной целостности (ЛВМ СФЦ) локомотива, разработанную АО «ВНИКТИ» (рис. 2).

Такое представление локомотива, абсолютно не похожее на его структурную или функциональную схему, позволяет учитывать влияние элементов оборудования, различных по назначению и характеру выполняемой работы, а также специфику этой работы. ЛВМ СФЦ локомотива оптимизирована по количеству структурных элементов для адекватного расчета безотказности локомотива и позволяет вписать в нее локомотив любого типа, исходя из его конструкторского состава [10].

Анализ способов обеспечения и контроля надежности создаваемого локомотива

Анализ выполнялся для определения средств управления надежностью локомотива и последующего выбора номенклатуры показателей надежности.

Способы обеспечения надежности локомотивов в общем случае включают две группы средств: специальные и организационно-технические. Специальные средства используют при проектировании и изготовлении локомотивов. Эти сред-

ва направлены на оптимальное формирование избыточности различных видов, обеспечивающей требуемую надежность локомотива в части безотказности, долговечности и ремонтпригодности при допустимом уровне затрат на проектирование и изготовление. Значения показателей, характеризующих перечисленные свойства надежности локомотивов, можно оценить только расчетными и расчетно-экспериментальными методами. Эти методы позволяют выполнять анализ моделей, представляющих собой структуру локомотива и совокупность отношений в ней, таких как ЛВМ СФЦ локомотива, и оценку вероятностных или гамма-процентных показателей его свойств надежности. Применение таких методов и моделей обусловлено их адекватностью при малом количестве исходной информации, что характерно для стадии разработки локомотивов.

В условиях эксплуатации локомотивов действует большое количество факторов, влияющих на их надежность. На рис. 3 представлена классификация основных факторов, влияющих на надежность локомотивов в эксплуатации. Для обеспечения требуемого уровня надежности в эксплуатации применяют организационно-технические средства, нейтрализующие вышеуказанные факторы через максимально возможное снижение постепенных отказов и минимизацию их внезапного появления. Современными методами реализации организационно-технических средств являются анализ логистической поддержки (в том числе система технической эксплуатации локомотивов, ориентированная на безотказность) и интерактивные технические руководства. Испытания на надежность и подконтрольная эксплуатация локомотивов (опытного образца, установочной партии, серийных) — лучшие способы контроля достижения требуемой надежности. Эти мероприятия позволяют получить объективные свидетельства, характеризующие состояние локомотивов при их применении по назначению, и на их основе расчетно-экспериментальными методами оценить фактические значения показателей надежности локомотивов (средние и гамма-процентные). В случае недостаточности объема исходной информации, полученной в условиях эксплуатации, вместо оценки фактических значений показателей надежности локомотивов последовательным методом контролируют достижение требуемых значений этих показателей.

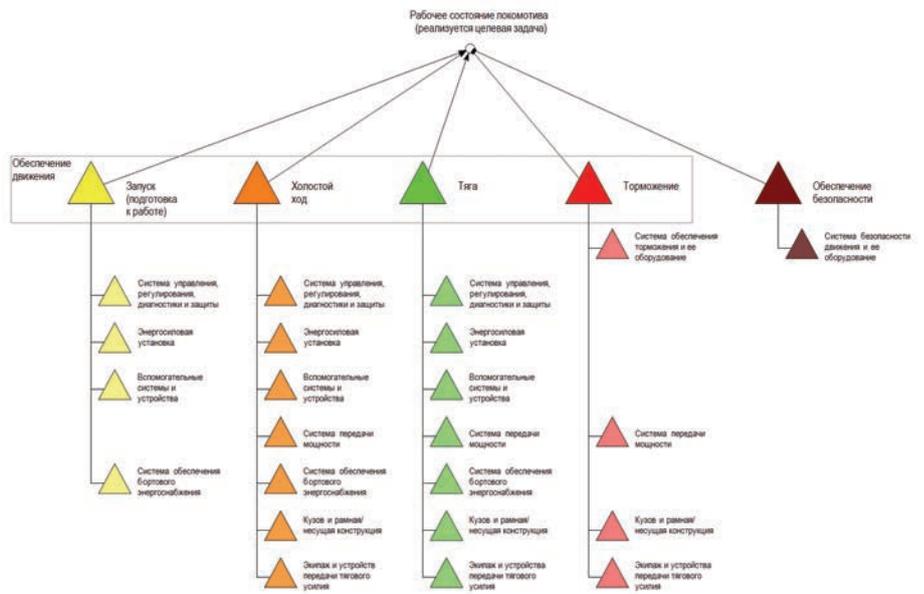


Рис. 2. Универсальная логико-вероятностная модель структурно-функциональной целостности (ЛВМ СФЦ) локомотива



Рис. 3. Основные факторы, влияющие на надежность локомотивов в эксплуатации

Таким образом, в результате в положениях ТЗ установлена номенклатура нормируемых показателей надежности, изменяющаяся в течение ЖЦ (табл. 2), определены точки контроля этих показателей.

Кроме того, в ходе разработки ТЗ на 2ТЭ35А выполнен анализ перспективы повышения требований к надежности проектируемого локомотива и возможности их реализации на основе анализа по критериям SMART¹. Это позволило определить требования, обосновав численные значения показателей надежности локомотива. В результате в положениях ТЗ установлено нижеследующее. Например,

¹ SMART — мнемоническая аббревиатура, используемая, чтобы обозначить критерии корректной формулировки целей (*specific* — конкретность; *measurable* — измеримость; *attainable* — достижимость; *relevant* — уместность; *time-bound* — ограниченность во времени).

требуемое значение гамма-процентной наработки до отказа тепловоза 2ТЭ35А должно быть не менее 0,14 млн км при поэтапном достижении значения вероятности y^1 в зависимости от стадий жизненного цикла локомотива согласно табл. 3.

Положения ТЗ на тепловоз 2ТЭ35А в части надежности представляют собой исходный вариант программы обеспечения надежности создаваемого локомотива. В дальнейшем в течение ЖЦ локомотива программа обеспечения надежности будет конкретизироваться не только методической составляющей, но и результатами анализа достигнутого уровня надежности тепловозов 2ТЭ35А и эффективности примененных средств.

На основании исследований можно сделать следующие выводы.

В современных условиях интенсификации производственной деятель-

Табл. 2. Номенклатура показателей надежности тепловоза 2ТЭ35А

Показатель надежности	Стадии жизненного цикла			
	Разработка			Эксплуатация
	Проект	Опытный образец	Установочная серия	Серийное производство
Безотказность	Вероятность безотказной работы или гамма-процентная наработка до отказа			Параметр потока отказов
Ремонтопригодность	—	Среднее время до восстановления Средняя оперативная продолжительность проведения плановых обслуживаний (ремонтов)		
Долговечность	Гамма-процентный ресурс	Гамма-процентный ресурс		
Готовность	Коэффициент внутренней готовности	Коэффициент внутренней готовности		
	Коэффициент технической готовности	Коэффициент технической готовности		

Табл. 3. Значение вероятности γ в течение жизненного цикла

№	Стадии жизненного цикла	γ , не менее
1	Разработка	0,6...0,9
1.1	Проектирование (проект)	0,6
1.2	Проектирование (опытный образец)	0,8
1.3	Постановка на производство (установочная партия)	0,9
2	Эксплуатация (серийное производство)	0,95...0,99

ности процесс обеспечения надежности локомотивов инициируется совместно с началом формирования ТЗ на разработку локомотива.

Разработка положений ТЗ в части надежности позволяет уйти от декларативного подхода к нормированию надежности локомотивов и включает в себя:

- анализ назначения локомотива, условий и режимов его технической эксплуатации;
- обоснование критериев оценки надежности локомотива по доминиру-

ющим последствиям потери работоспособности;

- установление связи между критериями оценки надежности локомотива и его конструктивными и технологическими особенностями;

- анализ способов обеспечения и контроля надежности создаваемого локомотива.

Программа обеспечения надежности локомотива является неотъемлемой частью обеспечения надежности локомотивов в течение ЖЦ, ее начальные положения отражает ТЗ в части надежности,

далее в течение ЖЦ локомотива положения программы дополняются методической составляющей и актуализируются по принципу «планирование — действие — контроль — корректировка».

ТЗ на тепловоз 2ТЭ35А в части надежности нацелено на организацию системной работы по обеспечению надежности разрабатываемого локомотива в течение ЖЦ, что отвечает современным условиям и ожиданиям потребителя в лице ОАО «РЖД».

Литература

1. Магистральные грузовые автономные локомотивы для Восточного полигона. Техн. требования.
2. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
3. Назаров О. Н., Бабков Ю. В., Белова Е. Е., Перминов В. А. Формирование научно обоснованных требований к инновационному подвижному составу в части надежности // Техника железных дорог. 2018. № 3. С. 40–49.
4. Газизов Ю. В., Белова Е. Е., Перминов В. А. SLA — новый инструмент регулирования взаимоотношений между поставщиком и потребителем услуг сервисного обслуживания локомотивов // Техника железных дорог. 2019. № 1. С. 39–41.
5. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. М.: ИНФРА-М, 2020.
6. ГОСТ 34056-2017. Транспорт железнодорожный. Состав подвижной. Термины и определения.
7. ГОСТ Р 57445-2017. Железнодорожные технические средства. Общие требования к методам определения ресурса.
8. Санитарные правила по проектированию, изготовлению и реконструкции локомотивов и специального подвижного состава железнодорожного транспорта: СП 2.5.1336-03.
9. Инструкция по учету дизельного топлива на локомотивах и моторвагонном подвижном составе, оборудованных автоматизированными системами его учета.
10. Назаров О. Н., Бабков Ю. В., Белова Е. Е. Разработан порядок проектного расчета безотказности локомотивов // Локомотив. 2019. № 7. С. 45–46.
11. Doran G. T. There's a S.M.A.R.T. Way to Write Management's Goals and Objectives // Management Review. 1981. Vol. 70. Issue 11. Pp. 35–36.

