

# 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

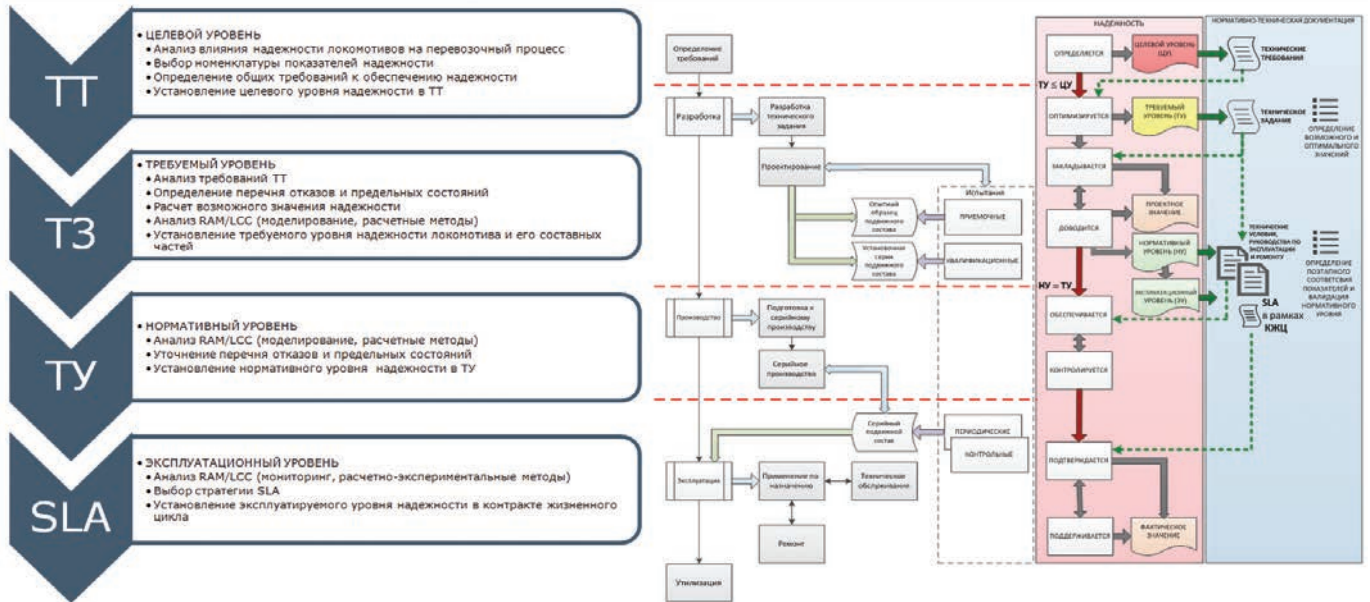


Рис. 1. Процессная модель нормирования и контроля требований надежности локомотивов [3]

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.

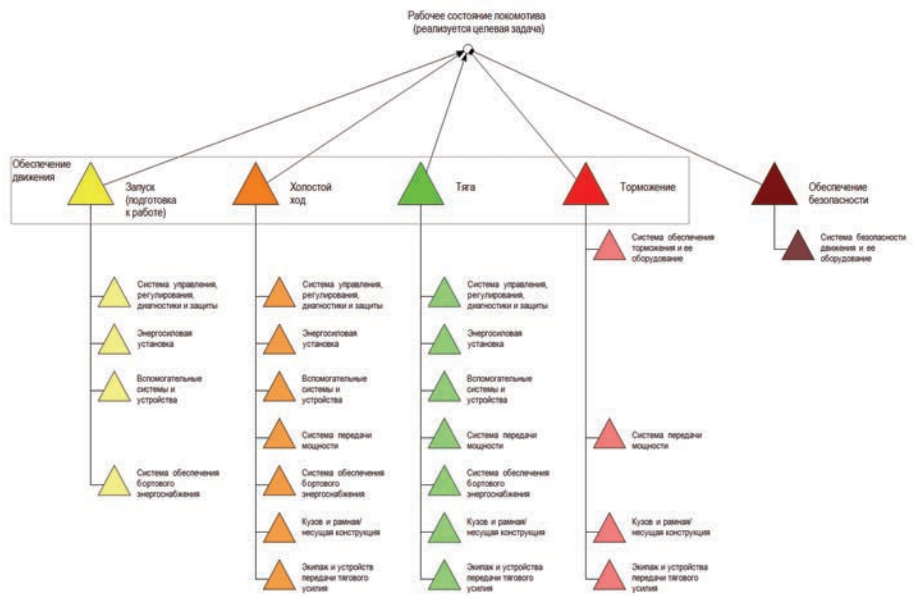


Рис. 2. Универсальная логико-вероятностная модель структурно-функциональной целостности (ЛВМ СФЦ) локомотива



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 SMART<sup>1</sup>. Это позволило определить требования, обосновав численные значения показателей надежности локомотива. В результате в положениях ТЗ установлено нижеследующее. Например,

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-

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

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  $\gamma$  в течение жизненного цикла

№	Стадии жизненного цикла	$\gamma$ , 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.

