

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Кафедра «Тепловозы и тепловые двигатели»

В.Г. Кочерга

## **НАДЕЖНОСТЬ ТЕПЛОВОЗОВ**

Рекомендовано  
Методическим советом ДВГУПС  
в качестве учебного пособия

Хабаровск  
Издательство ДВГУПС  
2012

УДК 629.454.1 (075.8)  
ББК О 235.2-021.1я73  
К 755

Рецензенты:

Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания»  
Тихоокеанского государственного университета  
(заведующий кафедрой доктор технических наук, профессор *В.А. Лашко*,  
доктор технических наук, профессор *Г.Б. Горелик*)

Ревизор по безопасности движения  
Дальневосточной дирекции тяги  
*А.В. Черкашин*

**Кочерга, В.Г.**

**К 755** Надежность тепловозов : учеб. пособие / В.Г. Кочерга. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – 66 с.: ил.

Приведены базовые понятия теории надежности тепловозов, рассмотрен ряд вопросов анализа показателей надежности, использующихся в практике эксплуатации тепловозов. Пособие включает подробные решения примеров практических задач в области надежности тепловозов.

Предназначено для студентов 5-го курса дневной и 6-го курса заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Надежность локомотивов».

УДК 629.454.1 (075.8)  
ББК О 235.2-021.1я73

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях существует тенденция к повышению массы грузовых поездов и увеличению пассажирских перевозок, при постоянно возрастающих требованиях к обеспечению безопасности движения. Поэтому одной из важнейших задач локомотивного хозяйства является обеспечение надежной работы локомотивного парка.

Качество работы локомотива (тепловоз или электровоз) как технической системы, предназначенной для осуществления тяги поездов, оценивается многими показателями, а именно мощность, скорость, сила тяги, расход топлива или электроэнергии, масла, песка и т. д. Но необходимо отметить, что для полного процесса оценки эксплуатационных качеств локомотива вышеперечисленных величин недостаточно. Он должен обладать способностью сохранять данные показатели в процессе своего жизненного цикла. В свою очередь данная способность и называется свойством *надежность*.

В случае отсутствия у локомотива необходимого уровня надежности основные показатели качества, такие как назначение и экономичность, не могут быть полностью и своевременно реализованы. Недостаточный уровень надежности может привести к снижению технической и экономической эффективности использования локомотивного парка, что приводит к росту затрат на перевозочную работу, выполнение неплановых видов ремонта вследствие отказов узлов, деталей и целых сборочных единиц.

В настоящем пособии основное внимание уделено вопросам анализа надежности, а также расчету основных количественных показателей надежности локомотивов в процессе эксплуатации.

Пособие по каждому разделу включает примеры задач с пошаговым и развернутым решением. Примеры задач предназначены для студентов очной и заочной форм обучения при самостоятельной подготовке.

# **1. ЗАДАЧИ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

## **1.1. Задачи в области надежности тепловозов**

Как наука надежность тепловозов является научной базой для создания системы управления надежностью локомотивов в эксплуатации, обеспечения устойчивости и эффективности перевозочного процесса и безопасности движения поездов, которая должна решать следующие задачи:

- количественная оценка уровня надежности существующего локомотивного парка в конкретных условиях эксплуатации на различных полигонах тяги;
- создание новых локомотивов с заданным оптимальным уровнем надежности для различных условий эксплуатации;
- разработка оптимальной системы технического обслуживания и ремонта локомотивов;
- разработка методов и технических средств диагностирования, а также автоматизации процессов анализа, контроля надежности в эксплуатации;
- разработка и применение современных технологий восстановления работоспособности отказавших и изношенных узлов и деталей локомотивов;
- оптимизация системы снабжения запасными частями и материалами для ремонта локомотивов.

## **1.2. Основные термины и определения дисциплины**

Термины и определения основных понятий в области надежности установлены в ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Термины и определения» применительно к техническим объектам. Необходимо отметить, что применительно к железнодорожному транспорту, наряду с вышеупомянутым государственным стандартом, используется ОСТ 32.46-95 «Тяговый подвижной состав железнодорожного транспорта. Надежность. Термины и определения». Отраслевой стандарт устанавливает термины и определения основных понятий в области надежности для применения в документации всех видов, научно-технической и справочной литературе организаций и предприятий, выпускающих, эксплуатирующих и ремонтирующих магистральные, маневровые и промышленные тепловозы, электровозы, моторвагонный подвижной состав, а также их сборочные единицы и детали. В стандарте все термины и их определения даны применительно к техническому объекту, под которым понимается, в зависимости от решаемой задачи, единицы тягового подвижного состава, их сборочные единицы и детали, рассматриваемые в период проектирования, производства, эксплуатации, ремонта, исследований и испытаний на надежность. Применение данного отраслевого стандарта, наряду с ГОСТ 27.002-89, является

обязательным во всех видах технической документации: учебной, технической, справочной и другой литературе.

С точки зрения теории надежности любой технической объект (система, устройство, элемент) можно охарактеризовать его свойствами, техническим состоянием и приспособленностью к восстановлению после потери работоспособности (рис. 1.1). При этом важнейшим комплексным свойством технического объекта является его надежность.

Согласно ГОСТ 27.002-89 [1] под *надежностью* понимается свойство технического объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

В свою очередь ОСТ 32.46-95 дает расшифровку понятия «надежность» применительно к локомотивам [2]. Для локомотивов основной требуемой функцией является выполнение эксплуатационной работы (соответствующей регламентируемому назначению) с реализацией свойств, установленных техническими условиями, при обеспечении безопасности движения.

Под заданными функциями сборочных единиц понимается обеспечение нормального функционирования локомотивов в определенных условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. Это возможно в том случае, если все технические параметры данной сборочной единицы находятся в пределах установленных допусков. К техническим параметрам относятся, например, температура охлаждающей воды, степень очистки воздуха и т. д.

Под эксплуатационными показателями тепловозов понимаются основные показатели, такие как мощность, скорость, сила тяги, расход дизельного топлива, масла песка и т. д., оговоренные в соответствующей документации.

Таким образом, подводя итог вышесказанному, под *надежностью локомотива (тепловоза)* понимается его свойство перевозить грузы, пассажиров, сохраняя при этом мощность, тяговые свойства, скорость и т. д., в течение времени от начала эксплуатации до списания.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения технического объекта и условий его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

*Безотказностью* называется свойство объекта (узел, деталь) непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в конкретных условиях эксплуатации как в период его использования по назначению, так и в периоды хранения, отстоя в резерве, транспортирования.

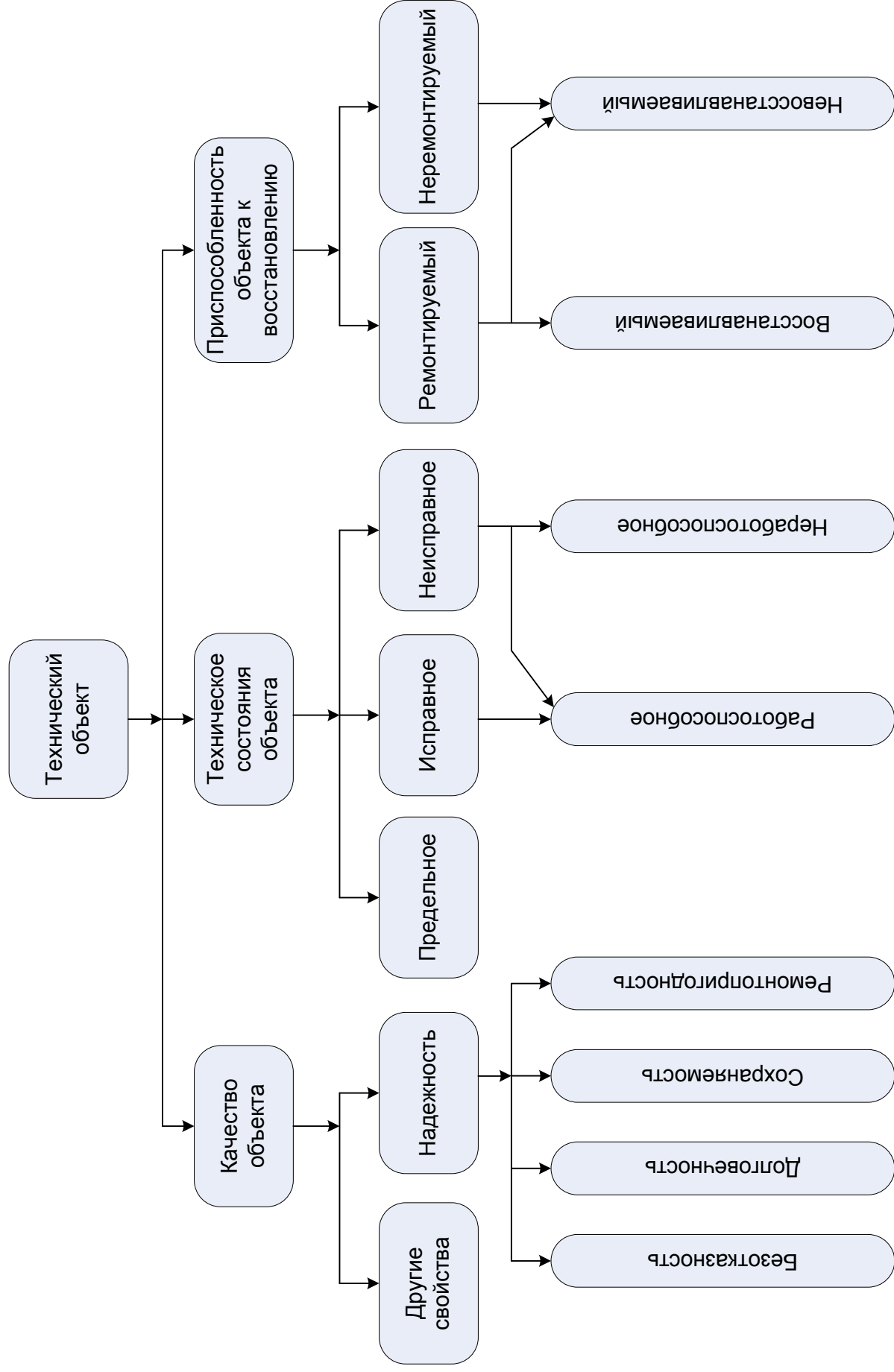


Рис. 1.1. Основные характеристики технического объекта

Для тепловоза или его сборочной единицы интервал наработки, в котором рассматривается безотказность, как правило, определяется периодичностью его технического обслуживания и ремонта. В этом интервале наработки тепловоз или его сборочная единица должна находиться в работоспособном состоянии.

Под *безотказностью тепловоза* понимают сохранение работоспособного состояния между смежными техническими обслуживаниями ТО-3.

*Долговечностью* называется свойство объекта (узел, деталь) длительно сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

*Сохраняемость* – свойство объекта (узел, деталь) непрерывно сохранять исправное и работоспособное состояние в течение срока хранения и транспортирования, т. е. до начала эксплуатации.

В процессе хранения и транспортирования технические объекты подвергаются неблагоприятным воздействиям, например, колебаниям температуры, действию влажного воздуха, вибрациям и т. д. В результате после хранения и транспортирования технический объект может оказаться в неработоспособном и даже в предельном состоянии. Сохраняемость технического объекта характеризуется его способностью противостоять отрицательному влиянию условий и продолжительности его хранения и транспортирования [2].

В зависимости от условий и режимов применения объекта требования сохраняемости предъявляются по-разному. Для некоторых классов технических объектов может быть поставлено требование, чтобы после хранения объект находился в таком же состоянии, что и к моменту начала хранения. В этом случае объект будет удовлетворять требованиям безотказности, долговечности и ремонтпригодности, предъявляемым к объекту к моменту начала хранения. В реальных условиях происходит ухудшение параметров, характеризующих работоспособность объекта, а также снижается его остаточный ресурс. В одних случаях достаточно, чтобы после хранения и транспортирования объект оставался в работоспособном состоянии. В большинстве же других случаев требуется, чтобы объект сохранял достаточный запас работоспособности, т. е. обладал достаточной безотказностью после хранения и транспортирования. Следует также различать сохраняемость объекта до ввода в эксплуатацию и сохраняемость объекта в период эксплуатации (при перерывах в работе). Во втором случае срок сохраняемости будет являться составной частью срока службы.

*Ремонтпригодность* объекта (узел, деталь) – это приспособленность к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и повреждений проведением ремонтов и технического обслуживания.

Термин «ремонтпригодность» традиционно трактуется в широком смысле. Этот термин эквивалентен международному термину «приспособленность к поддержанию работоспособного состояния», т. е. «поддерживаемость». Помимо ремонтпригодности, это понятие включает в себя «обслу-

живаемость», т. е. приспособленность объекта к техническому обслуживанию, «контролепригодность» и приспособленность к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, а также причин их вызывающих. Более общее понятие «поддерживаемость» и «эксплуатационная технологичность» включают в себя ряд технико-экономических и организационных факторов, таких как, например, качество подготовки обслуживающего персонала [1].

*Состояния*, в которых может находиться технический объект (тепловоз, его элементы), определяются в зависимости от того, соответствует ли он предъявляемым требованиям.

*Исправным состоянием* является состояние технического объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией. К нормативно-технической, эксплуатационной и ремонтной документации применительно к тяговому подвижному составу относятся рабочие чертежи завода-изготовителя, технические условия, ПТЭ, инструкции и правила технического обслуживания и ремонта, хранения и транспортирования.

В свою очередь *неисправным состоянием* технического объекта являются его условия, при которых он не соответствует хотя бы по одному из требований, установленных нормативно-технической документацией.

Исправное состояние технического объекта подразумевает *работоспособное состояние* технического объекта, т. е. такое состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

*Работоспособное состояние локомотива* – это состояние, при котором он соответствует требованиям ПТЭ железных дорог, заводских инструкций, правил ремонта и другой нормативной документации. Понятие «исправное состояние» шире, чем понятие «работоспособное состояние». Работоспособный локомотив, в отличие от исправного, удовлетворяет лишь тем требованиям существующей документации, которые обеспечивают его нормальное функционирование при выполнении перевозочной работы. При этом локомотив может не удовлетворять, например, требованиям, относящимся только к внешнему виду. Работоспособный локомотив или какая-либо из его сборочных единиц могут считаться неисправными, однако, их повреждения не настолько существенны, чтобы препятствовать нормальному его функционированию (например, нарушение декоративных покрытий, вмятина на уплотняющем пояске выхлопного клапана дизеля, трещина стекла контрольно-измерительного прибора, ослабление некоторых креплений и т. п.) [2].

Состояние технического объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической документации, называют *неработоспособным состоянием*.



Следует различать два вида неработоспособного состояния: устранимое и неустраняемое. В первом случае работоспособное состояние может быть восстановлено выполнением ремонтных работ, а во втором – восстановление технически невозможно или нецелесообразно.

*Предельным состоянием* называется состояние технического объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Неремонтируемое оборудование тепловоза достигает предельного состояния при возникновении отказа или при достижении заранее установленного предельного допустимого значения срока службы или ресурса, которые в свою очередь устанавливаются из соображений безопасности эксплуатации или в связи с необратимым снижением эффективности использования ниже допустимой.

Для ремонтируемых объектов, к которым относится локомотив, предельное состояние определяется наступлением момента, когда его дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна по одной или нескольким из приведенных ниже причин:

- становится невозможным поддержание безопасности (обслуживающего персонала и движения поездов), безотказности или эффективности эксплуатации на допустимом уровне и требуется отправка локомотива на текущий или капитальный ремонт, т. е. временное прекращение использования по назначению;

- в результате изнашивания и (или) старения локомотив имеет такое состояние, при котором его ремонт требует недопустимо больших затрат или не обеспечивает необходимой степени восстановления исправного или работоспособного состояний. В этом случае предельное состояние предполагает окончательное прекращение применения локомотива по назначению [2].

*Ремонтируемый объект* – объект, для которого проведение ремонта предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

*Неремонтируемый объект* – объект, для которого проведение ремонта не предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

*Восстанавливаемый объект* – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

*Невосстанавливаемый объект* – объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

### 1.3. Повреждения, отказы и их классификация

*Событием* называется переход технического объекта из одного состояния в другое. Примером события является повреждение или отказ.

*Повреждением* является переход технического объекта из исправного состояния в неисправное работоспособное состояние.

В свою очередь переход технического объекта из работоспособного состояния в неработоспособное происходит вследствие *отказа*.

Таким образом, *отказом* технического объекта называется событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния.

*Критерием отказа* является признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния технического объекта, установленные в нормативной и (или) конструкторской документации.

Отказы технических объектов различаются по видам и классифицируются по различным признакам (табл. 1.1).

Внезапные отказы могут происходить из-за постепенного накопления повреждений, которые нельзя заранее обнаружить имеющимися в эксплуатации техническими средствами. Например, постепенный рост усталостной трещины в элементах конструкции экипажной части тепловоза приводит к внезапному разрушению элемента рамы тележки, упругих элементов рессорного подвешивания, элементов тягового привода, колесных пар; недостаток или утечка смазки – к внезапному разрушению сепаратора или вкладышей подшипников и т. п. Причиной возникновения внезапно отказа могут быть неправильные действия эксплуатирующего и ремонтного персонала. Как правило, причины, вызывающие внезапные отказы, не повторяются в разных экземплярах однотипных машин. В силу непредсказуемости действия факторов, вызывающих появление внезапных отказов, вероятность их возникновения не зависит от длительности предшествующего периода работы детали или элемента.

Причиной появления постепенных отказов может быть старение и усталость металлов, изнашивание поверхностей сопряженных деталей и т. п. Например, изоляция электрических машин и аппаратов со временем теряет эластичность, становится хрупкой, происходит снижение ее сопротивления; резиновые и резинометаллические детали теряют упругие свойства, расслаиваются; смазочные материалы густеют, металлы подвергаются коррозии. Постепенные отказы можно считать естественным следствием эксплуатации машин [3].

Таблица 1.1

**Классификация отказов технических объектов**

Признак отказа	Вид отказа	Характеристика отказа
Характер изменения параметра до момента возникновения отказа	Внезапный	Скачкообразное изменение значений одного или нескольких параметров технического объекта
	Постепенный	Постепенное изменение одного или нескольких параметров за счет медленного, постепенного ухудшения качества технического объекта (например, износ поршневых колец в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания – постепенный отказ)
Связь с отказами других элементов (узлы, устройства)	Независимый	Отказ не обусловлен повреждениями или отклонениями других элементов (узлов, устройств)
	Зависимый	Отказ обусловлен повреждениями или отказами других элементов (узлов), (например, из-за поломки конденсатора в электрической схеме может выйти из строя другой элемент)
Возможность использования элемента после отказа	Полный	Полная потеря работоспособности, исключающая использование технического объекта по назначению
	Частичный	Дальнейшее использование технического объекта возможно, но с меньшей эффективностью
Характер проявления отказа	Сбой	Самоустраняющийся отказ, приводящий к кратковременному нарушению работоспособности
	Перемежающийся	Многokrатно возникающий сбой одного и того же характера, связанный с обратными случайными изменениями режимов работы и параметров устройства
	Устойчивый	Отказ, устраняемый только в результате проведения восстановительных работ, является следствием необратимых процессов в деталях и материалах
Причина возникновения отказа	Конструкционный	Отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленных правил и (или) норм конструирования объекта
	Производственный	Отказ, возникающий в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления или ремонта объекта, выполняющегося на ремонтном предприятии
	Эксплуатационный	Отказ, возникающий в результате нарушения установленных правил и (или) условий эксплуатации объекта

Общая схема состояний и событий технического объекта приведена на схеме (рис. 1.2.).

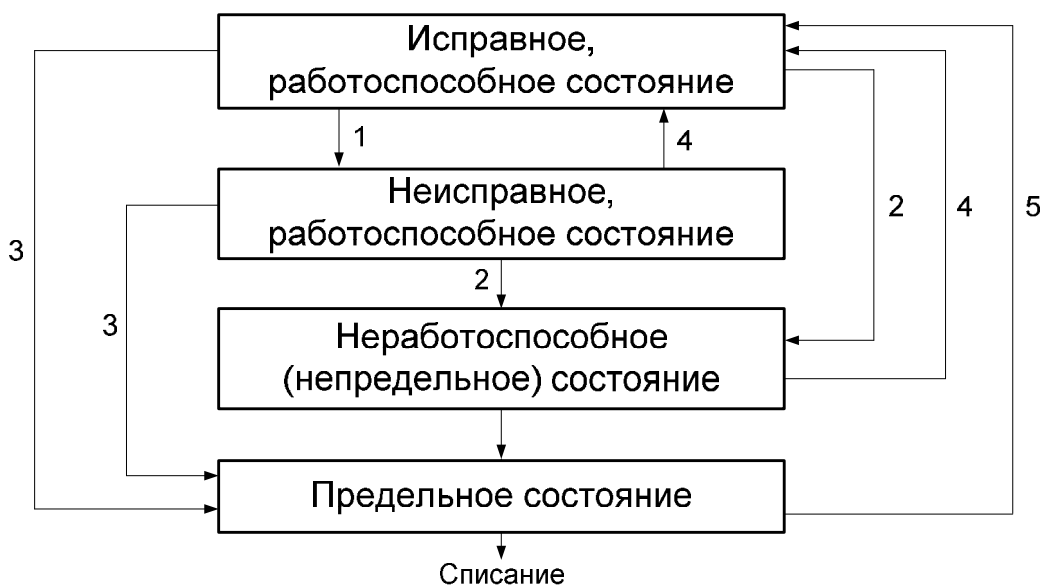


Рис. 1.2. Схема состояний и событий: 1 – повреждение; 2 – отказ; 3 – переход объекта в предельное состояние из-за неустранимого нарушения требований безопасности, снижения эффективности эксплуатации, морального старения и других факторов; 4 – восстановление; 5 – ремонт

*Отказом локомотива (тепловоза)* считается событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния, в результате чего локомотив (тепловоз) полностью или частично теряет способность выполнять перевозочный процесс. Последствиями отказа локомотива (тепловоза) являются: невыполнение заданных показателей по массе поезда, скорости, времени стоянок, времени хода; восстановление в пути следования, даже без нарушения графика движения; неплановый ремонт; досрочная замена узла; завышенный объем планового ремонта.

Работоспособное состояние тепловоза характеризуется совокупностью значений некоторых технических параметров, поэтому признаком возникновения отказа является выход значений любого из этих параметров за пределы допусков, в том числе из-за наличия хотя бы одного дефекта недопустимого в эксплуатации по действующей нормативно-технической документации, до устранения которого тепловоз не может быть выдан под поезд.

Признаками (критериями) неработоспособного состояния являются факты порч в пути следования и выполнения непланового ремонта.

*Порчей тепловоза* в пути следования считается его повреждение или отказ, из-за которого допущена вынужденная остановка поезда свыше 30 мин на перегоне, а также на промежуточной станции (где не предусмотрена стоянка поезда расписанием движения поездов). Если при этом движение поезда продолжено путем замены или с помощью другого тепलो-

за, такое повреждение или отказ считается порчей с требованием вспомогательного тепловоза («резерва»).

Если при устранении повреждения или отказа тепловоза на промежуточной станции локомотивной бригадой затрачено на 30 мин больше, чем предусмотрено расписанием, то такой случай также считается порчей.

Неплановым ремонтом считается заход тепловоза в депо для устранения отказа и его последствий в период между (или на) ТО-3, ТО-4 и плановыми ремонтами (или плановых ремонтах) с перечислением его в неэксплуатируемый парк.

В зависимости от характера последствий отказы делятся на четыре вида, которые приведены в табл. 1.2 [4].

Таблица 1.2

### Виды отказов локомотива

Отказы по последствиям	Характеристика отказов	Критерии отказов
Отказ I вида	Критический отказ – внезапно приводящий локомотив в предельное состояние и создающий угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды	Изломы рам кузова, шкворня, рамы тележки, оси и центра колесной пары, разрушение корпуса буксы, шестерен тягового редуктора, излом подвески тягового редуктора
Отказ II вида	Существенный отказ, влекущий за собой экономический ущерб, не соизмеримый с затратами на ремонт	Состояние тепловоза, исключающее возможность ведения поезда (порчи в пути следования)
Отказ III вида	Существенный отказ, трудно устранимый и приводящий к значительному материальному ущербу	Состояние локомотива, требующее выполнения непланового ремонта с простоем (затратами труда) более критериальной величины указанной в нормативно-технической документации (например, демонтаж дизеля или тягового генератора, выкатка тележек и т. п.)
Отказ IV вида	Несущественный отказ, легко устранимый, не приводящий к значительному материальному ущербу	Состояние локомотива, требующее выполнения непланового ремонта с простоем (затратами труда) менее критериальной величины указанной в нормативно-технической документации (например, устранение «земли» в низковольтной цепи и т. п.)

*Техническим ресурсом* называют наработку объекта от начала его эксплуатации или возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

*Срок службы* – календарная продолжительность от начала эксплуатации объекта или его возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

#### **1.4. Система управления надежностью тепловозов**

Для обеспечения и повышения требуемого уровня надежности локомотива необходимо иметь единую систему мероприятий, взаимосвязанных конечной целью – достижением высокой степени работоспособности и максимальной эффективности его функционирования в эксплуатации.

Основными принципами управления надежностью локомотивов являются установление, обеспечение и поддержание ее нормированного техническим условиям уровня на этапах создания (проектирование, изготовление, испытание) и их использования (эксплуатация, ремонт). Эти этапы составляют структуру жизненного цикла и, следовательно, характеризуют структуру управления надежностью за весь такой цикл [5].

На стадии проектирования определяются заданные техническими требованиями рабочие характеристики всего оборудования, в том числе и показатели надежности.

На стадии изготовления и испытания обеспечиваются проектные характеристики всего оборудования, в том числе показатели надежности, заложенные при проектировании. Достигается это путем строгого выполнения принятых (разработанных) технологических процессов и использования предусмотренных проектом комплектующих элементов и необходимых материалов.

На этапе эксплуатации и ремонта реализуется заложенный при изготовлении уровень надежности. Поддерживаться этот уровень должен за счет выполнения всех требований и положений нормативно-технической документации по техническому обслуживанию и ремонту тепловозов.

Установление, обеспечение и поддержание надежности должны осуществляться путем целенаправленного комплексного воздействия на все физико-технические и организационно-технические факторы, определяющие надежность локомотивов в эксплуатации. К основным составляющим такого воздействия на надежность, т. е. к основным типовым мероприятиям системы управления надежностью на всех этапах жизненного цикла тепловоза, относятся:

*при проектировании:*

- тщательное и всестороннее изучение и анализ информации о безотказности, долговечности и ремонтпригодности основных элементов оборудования локомотивов-прототипов, эксплуатируемых в различных климатических районах;

- изучение материалов по зарубежным локомотивам-аналогам, т. е. локомотивам аналогичных назначений и мощности, имеющим высокие технические характеристики, в том числе и по показателям надежности;
- всесторонняя проработка требований технического задания на разработку локомотива по показателям надежности с оценкой возможностей их выполнения промышленностью, в том числе с позиции экономической целесообразности;
- проработка и выбор варианта схемного решения конструкции локомотива с учетом требований, принятых по техническому заданию;
- подбор необходимых для принятого схемного решения комплектующих элементов, удовлетворяющих требованиям надежности в целом;
- подбор материалов с удовлетворяющими современным требованиям характеристиками усталостной прочности, износоустойчивости, антикоррозийной и кавитационной стойкости для элементов оборудования собственного производства;
- проведение специальных стендовых, в том числе ускоренных испытаний комплектующих элементов, материалов и элементов собственного производства с целью проверки их характеристик, влияющих на надежность, а также получение и оценка отсутствующих показателей их надежности;
- выполнение необходимых расчетов для определения вероятности безотказной работы и среднего ресурса элементов оборудования локомотива по условиям изнашивания, циклической и статической прочности;
- выполнение расчета нормируемых показателей безотказности локомотива по схемно-функциональному методу с учетом аналогичных показателей для основных элементов оборудования;
- выбор методов и средств контроля за работой систем и основных элементов оборудования и их техническим состоянием (контрольно-измерительные и бортовые диагностические приборы), обеспечение контролепригодности контролируемых элементов оборудования локомотива;
- разработка мер, обеспечивающих ремонтпригодность элементов оборудования локомотива на техническом обслуживании и текущем ремонте, а также необходимых приспособлений для ремонта;
- разработка мер, обеспечивающих оптимальные климатические и эргономические условия в кабине машиниста;
- составление инструкции по техническому обслуживанию локомотивов в эксплуатационной и другой нормативно-технической документации, поставляемой потребителям вместе с тепловозом, установление норм расхода запасных частей на техническое обслуживание и текущий ремонт локомотивов;
- разработка мер по защите оборудования локомотива от механических, электрических и других перегрузок, а также по очистке воздуха в системах от пыли и влаги;
- подбор смазочных масел и консистентных смазок с удовлетворяющими современным требованиям характеристиками;

*при изготовлении:*

- выбор оптимальных технологических процессов изготовления и сборки локомотивов, а также их производственных испытаний (реостатные, обкаточные, заводские);
- входной контроль качества комплектующих элементов и материалов для собственного производства;
- пооперационный контроль качества изготовления элементов оборудования собственного производства и сборки локомотивов;
- приемочный контроль качества изготовления готовых элементов собственного производства;
- инспекционный контроль за качеством локомотива в целом;
- организация производства запасных частей в объеме и номенклатуре, обеспечивающих полную потребность при эксплуатации локомотивов;

*при эксплуатации и ремонте:*

- оптимизация норм межремонтных периодов и объемов обязательных работ на техническом обслуживании и текущем ремонте с учетом фактических условий эксплуатации и режимов работы локомотивов;
- контроль качества выполнения обязательных работ на техническом обслуживании, текущем ремонте и неплановых ремонтах после отказов локомотивов, а также соблюдения норм межремонтных периодов;
- совершенствование ремонтной базы депо и технологических процессов ремонта;
- использование при техническом обслуживании и текущем ремонте методов и средств технической диагностики;
- тщательное выполнение осмотровых операций локомотивными бригадами на ТО-1 и ремонтниками на ТО-2;
- постоянный учет и обобщение первичной информации о повреждениях и отказах элементов оборудования, наработке, простоях на плановых и неплановых видах ремонта, затратах труда и средств, а также о других показателях эффективности использования локомотивов, в том числе при эксплуатационных испытаниях опытных образцов; создание и пополнение банка информации о повреждениях и отказах локомотивов;
- контроль за соблюдением норм массы поездов на обслуживаемых участках, рассчитанных по правилам тяговых расчетов;
- контроль за качеством горюче-смазочных материалов;
- обеспечение ремонтных локомотивных депо и ремонтных заводов качественными запасными частями и материалами в требуемых объеме и номенклатуре, периодическая корректировка дифференцированных норм расхода запасных частей и материалов;
- корректировка при необходимости правил текущего и капитального ремонта локомотивов, в том числе по ремонтным допускам на регламентируемые параметры;
- восстановление при капитальном ремонте полного (или близкого к полному) ресурса локомотива;



- организация постоянной технической учебы в депо для повышения квалификации локомотивных бригад и ремонтников;
- периодический количественный и качественный анализ информации, поступающей из локомотивных депо и локомотиворемонтных заводов о повреждениях и отказах элементов оборудования по типам локомотивов;
- разработка конкретных мероприятий по повышению надежности выпускаемых и эксплуатируемых локомотивов.

Основополагающим документом управления надежностью локомотивов является программа обеспечения надежности тепловозов [6]. Программа включает в себя любые необходимые работы по надежности, не отраженные в типовом перечне, например, резервирование элементов оборудования при проектировании, доработку конструкции и технологии изготовления элементов, ненадежно функционирующих на выпускаемых локомотивах, в том числе для конкретных условий эксплуатации и режимов работы; проведение специальных испытаний усовершенствованных (опытных) элементов на стендах и в рядовой эксплуатации на локомотивах; специальные исследования для установления причин возникновения отказов, технической и экономической эффективности ранее проведенных мероприятий, влияния конкретных физико-технических и организационных факторов на надежность локомотива и т. д.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите назначение и основные задачи надежности локомотивов.
2. Дайте определение основным свойствам надежности.
3. В чем основная разница между такими понятиями, как ремонтируемый и восстанавливаемый объект, а также неремонтируемый и невосстанавливаемый объект?
4. На примере соотношений понятий «неисправность» и «работоспособность» покажите подмножества исправных, неисправных и работоспособных объектов.
5. Какие основные виды отказов технических систем?
6. Дайте определение основным видам отказов локомотива.
7. Какие основные этапы жизненного цикла локомотива?

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

### 2.1. Общие сведения

Показателями надежности являются количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность всего объекта в целом. Численное значение показателей надежности может быть выраже-

но размерными или безразмерными величинами, оно может быть различным в зависимости от этапов существования объекта [7].

Определение на практике количественных показателей надежности позволяют решить в процессе эксплуатации следующие задачи: во-первых, производить расчет надежности объекта, находящегося в эксплуатации; во вторых, сформулировать требования, предъявляемые к вновь создаваемым объектам; в-третьих, заранее рассчитать сроки службы объекта и необходимое количество запасных частей, плановое задание на ремонт и т. д.

Количественные показатели, характеризующие надежность объекта подразделяются на два типа: единичные и комплексные [3].

*Единичным показателем* надежности является показатель, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта.

*Комплексный показатель* характеризует несколько свойств, составляющих надежность объекта.

Показатели надежности локомотива, как и любого другого изделия, не могут измеряться непосредственно; они определяются по априорной (статистической) информации о повреждениях и отказах элементов оборудования статистическими методами по математическим выражениям.

В табл. 2.1 показаны основные количественные показатели свойств надежности.

Таблица 2.1

### Количественные показатели свойств надежности

Свойства надежности	Показатели надежности
<b>Единичные показатели надежности</b>	
Безотказность	Вероятность безотказной работы
	Вероятность отказа
	Частота отказов
	Интенсивность отказов
	Средняя наработка до отказа
	Параметр потока отказов
	Среднее значение параметра потока отказов
	Средняя наработка на отказ
Долговечность	Пробеги между ТО и Р
	Назначенный ресурс
	Гарантийный срок службы
	Гамма-процентная наработка
	Срок службы до списания
Ремонтопригодность	Среднее время простоя в ремонте
	Среднее время восстановления
	Средняя трудоемкость восстановления
	Средняя стоимость ремонта
Сохраняемость	Срок сохраняемости
	Среднее время исправного состояния при хранении

Свойства надежности	Показатели надежности
<b>Комплексные показатели надежности</b>	
Коэффициент готовности	
Коэффициент оперативной готовности	
Коэффициент простоя	
Коэффициент технического использования локомотивов	
Коэффициент затрат на техническое обслуживание и ремонт	
Ремонтоемкость	

## 2.2. Показатели безотказности

### 2.2.1. Вероятность безотказной работы

*Вероятностью безотказной работы* называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации, в пределах заданной наработки, не произойдет ни одного отказа [3].

Вероятность безотказной работы обозначается как  $P(l)$ , которая определяется по формуле

$$P(l) = \frac{N_0 - r(l)}{N_0} = 1 - \frac{r(l)}{N_0}, \quad (2.1)$$

где  $N_0$  – число элементов в начале испытания;  $r(l)$  – число отказов элементов к моменту наработки.

Следует отметить, что чем больше величина  $N_0$ , тем с большей точностью можно рассчитать вероятность  $P(l)$ .

В начале эксплуатации исправного тепловоза  $P(0) = 1$ , так как при пробеге  $l = 0$  вероятность того, что ни один элемент не откажет, принимает максимальное значение – 1. С ростом пробега  $l$  вероятность  $P(l)$  будет уменьшаться. В процессе приближения срока эксплуатации к бесконечно большой величине вероятность безотказной работы будет стремиться к нулю  $P(l \rightarrow \infty) = 0$ . Таким образом, в процессе наработки величина вероятности безотказной работы изменяется в пределах от 1 до 0. Характер изменения вероятности безотказной работы в функции пробега показан на рис. 2.1.

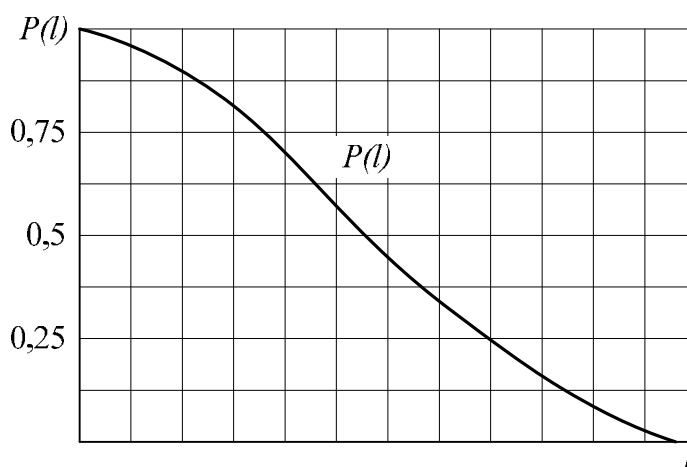


Рис. 2.1. График изменения вероятности безотказной работы  $P(l)$  в зависимости от наработки

Основными достоинствами использования данного показателя при расчетах является два фактора: во-первых, вероятность безотказной работы охватывает все факторы, влияющие на надежность элементов, позволяя достаточно просто судить о его надежности, так как чем больше величина  $P(l)$ , тем выше надежность; во-вторых, вероятность безотказной работы может быть использована в расчетах надежности сложных систем, состоящих из более чем одного элемента.

### 2.2.2. Вероятность отказа

*Вероятностью отказа* называют вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации, в пределах заданной наработки произойдет хотя бы один отказ [7].

Вероятность отказа обозначается как  $Q(l)$ , которая определяется по формуле

$$Q(l) = 1 - P(l) = \frac{r(l)}{N_0}. \quad (2.2)$$

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа являются событиями противоположными и несовместимыми.

В начале эксплуатации исправного тепловоза  $Q(0) = 0$ , так как при пробеге  $l = 0$  вероятность того, что хотя бы один элемент откажет, принимает минимальное значение – 0. С ростом пробега  $l$  вероятность отказа  $Q(l)$  будет увеличиваться. В процессе приближения срока эксплуатации к бесконечно большой величине вероятность отказа будет стремиться к единице  $Q(l \rightarrow \infty) = 1$ . Таким образом, в процессе наработки величина вероятности отказа изменяется в пределах от 0 до 1. Характер изменения вероятности отказа в функции пробега показан на рис. 2.2.

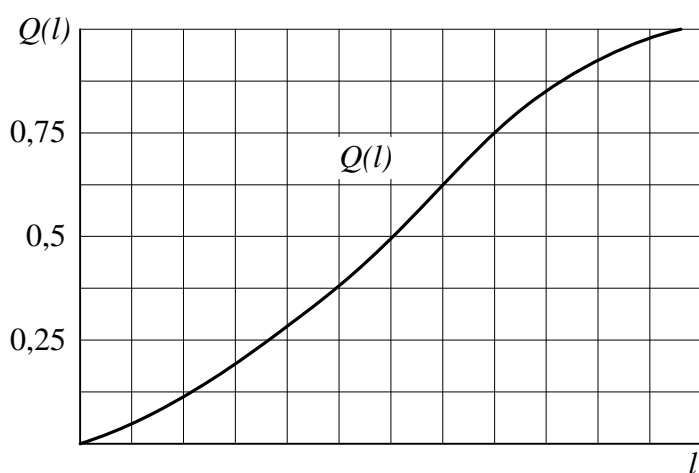


Рис. 2.2. График изменения вероятности отказа  $Q(l)$  в зависимости от наработки

### 2.2.3. Частота отказов

*Частота отказов* – это отношение числа элементов в единицу времени или пробега отнесенного к первоначальному числу испытываемых элементов. Другими словами частота отказов является показателем, харак-

теризующим скорость изменения вероятности отказов и вероятности безотказной работы по мере роста длительности работы [7].

Частота отказов,  $\frac{1}{\text{км}}$ , обозначается как  $a(\Delta l)$  и определяется по формуле

$$a(\Delta l) = \frac{r(\Delta l)}{N_0 \cdot \Delta l}, \quad (2.3)$$

где  $r(\Delta l)$  – количество отказавших элементов за промежуток пробега  $\Delta l$ .

Данный показатель позволяет судить по его величине о числе элементов, которые откажут на каком-то промежутке времени или пробега, также по его величине можно рассчитать количество требуемых запасных частей.

Характер изменения частоты отказов в функции пробега показан на рис. 2.3.

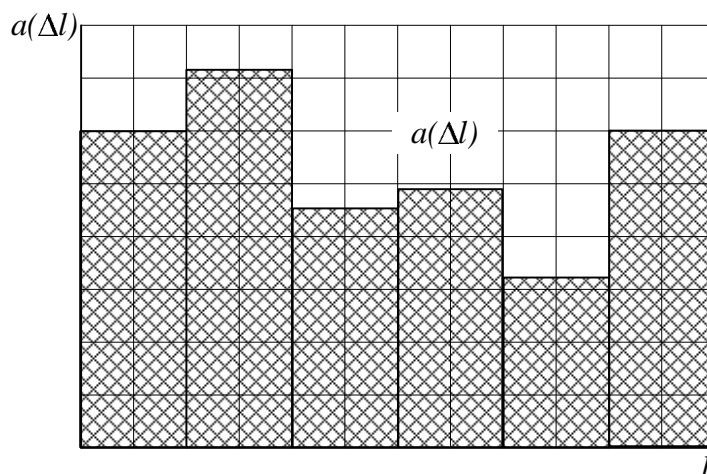


Рис. 2.3. Гистограмма изменения частоты отказов  $a(\Delta l)$  в зависимости от наработки

#### 2.2.4. Интенсивность отказов

*Интенсивность отказов* представляет собой условную плотность возникновения отказа объекта, определяемую для рассматриваемого момента времени или наработки при условии, что до этого момента отказ не возник. Иначе интенсивность отказов – это отношение числа отказавших элементов в единицу времени или пробега к числу исправно работающих элементов в данный отрезок времени [3].

Интенсивность отказов обозначается как  $I(\Delta l)$  и определяется по формулам

$$\lambda(\Delta l) = \frac{r(\Delta l)}{N_{CP} \cdot \Delta l}, \frac{1}{\text{км}}; \quad (2.4)$$

$$N_{CP} = \frac{N(l) + N(l + \Delta l)}{2}. \quad (2.5)$$

Как правило, интенсивность отказов  $\lambda(\Delta l)$  является неубывающей функцией времени и обычно применяется для оценки склонности к отказам в различные моменты работы объектов.

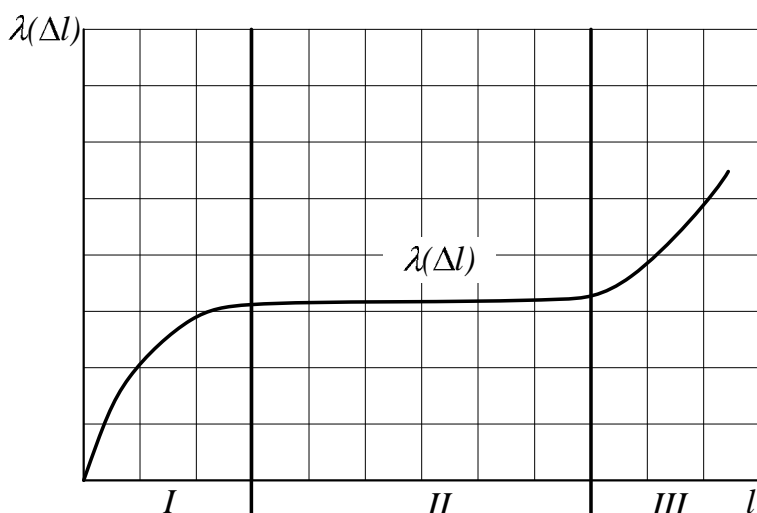


Рис. 2.4. График изменения интенсивности отказов  $\lambda(\Delta l)$  в зависимости от наработки

На рис. 2.4 представлен теоретический характер изменения интенсивности отказов в функции пробега.

На графике изменения интенсивности отказов, изображенном на рис. 2.4, можно выделить три основных этапа, отражающих процесс эксплуатации элемента или объекта в целом [8].

Первый этап, который также называется этапом приработки, характеризуется увеличением интенсивности отказов в начальный период

эксплуатации. Причиной роста интенсивности отказов на данном этапе являются скрытые дефекты производственного характера, вызванные дефектами расчета, конструирования и изготовления, недостаточным контролем качества сборки и монтажа оборудования, качеством комплектующих деталей и материалов.

Второй этап, или период нормальной работы, характеризуется стремлением интенсивности отказов к постоянному значению. В течение этого периода могут возникать случайные отказы в связи с появлением внезапной концентрации нагрузки, превышающей предел прочности элемента.

Третий этап, так называемый период форсированного старения. Характеризуется возникновением износных отказов. Дальнейшая эксплуатация элемента без его замены становится экономически не целесообразной.

### 2.2.5. Средняя наработка до отказа

*Средняя наработка до отказа* – это средний пробег безотказной работы элемента до отказа.

Средняя наработка, км, до отказа обозначается как  $L_1$  и определяется по формуле

$$L_1 = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{\sum_{i=1}^N r_i}, \quad (2.6)$$

где  $l_i$  – наработка до отказа элемента;  $r_i$  – число отказов.

Этот показатель характеризует безотказность локомотивов и их однотипных сборочных единиц, определяемую по наработками до первых отказов. Для неремонтируемых объектов данный показатель одновременно характеризует и их долговечность.

Средняя наработка до отказа может быть использована для предварительного определения сроков ремонта или замены элемента [7].

### 2.2.6. Параметр потока отказов

Значение *параметра потока отказов* характеризует плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени.

Показатель «параметр потока отказов» используется для характеристики изменения безотказности тепловозов и их восстанавливаемых сборочных единиц.

Значение параметра потока отказов,  $\frac{1}{\text{км}}$ , обозначается как  $\omega(\Delta l)$  и определяется по формуле

$$\omega(\Delta l) = a(\Delta l) \frac{L_{\text{общ}}}{\Delta l}. \quad (2.7)$$

### 2.2.7. Среднее значение параметра потока отказов

Среднее значение параметра потока отказов служит для оценки безотказности восстанавливаемых объектов в оцениваемом интервале наработки  $\Delta l$  и закономерности изменения безотказности объекта по интервалам наработки. Интервальные оценки,  $\frac{1}{\text{км}}$ , связаны со средним значением следующим отношением:

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^K \omega_i(\Delta l)}{K}, \quad (2.8)$$

где  $K$  – количество интервалов.

### 2.2.8. Средняя наработка на отказ

*Средняя наработка на отказ*  $L_2$ , км, представляет собой отношение суммарной наработки объекта к числу отказов в течение этой наработки

$$L_2 = \frac{L_{\text{общ}}}{r(L_{\text{общ}})}. \quad (2.9)$$

Данный показатель используется для характеристики безотказности локомотивов и ремонтируемых сборочных единиц с учетом как первых, так и последующих отказов.

## **2.3. Показатели долговечности**

### **2.3.1. Пробеги между техническими обслуживаниями и ремонтами**

Одним из важнейших показателей долговечности для тепловозов являются пробеги  $L_{Pi}$  между техническими обслуживаниями и ремонтами, во время которых они подвергаются ремонту, регулировке, контролю технического состояния. При этом необходимо различать нормативные значения  $L_{Pi}$ , установленные нормативно-технической документацией, и фактические значения  $L'_{Pi}$ , определяемые по статистическим данным локомотивных депо и железных дорог в конкретных условиях эксплуатации.

### **2.3.2. Назначенный ресурс**

*Назначенный ресурс  $T_{HP}$*  представляет собой суммарную наработку тепловоза (узел, деталь), при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена (независимо от его технического состояния) для проведения плановых технических обслуживаний и ремонтов или списания.

Целью установления назначенного ресурса является обеспечение принудительного заблаговременного прекращения применения тепловоза по назначению, исходя из требований безопасности или технико-экономических соображений.

### **2.3.3. Гарантийный срок службы**

*Гарантийный срок службы* тепловоза  $T_{ГАР}$  – это срок службы, в течение которого локомотивостроительный или локомотиворемонтный заводы гарантируют исправность тепловоза и несут материальную ответственность за возникшие неисправности при соблюдении технических условий эксплуатации.

### **2.3.4. Гамма-процентная наработка**

Для характеристики долговечности объектов используют *показатель гамма-процентная наработка  $L_\gamma$* , которая представляет собой наработку, в течение которой объект не откажет (или не достигнет предельного состояния)  $\gamma$  процентов объектов данного типа.



### 2.3.5. Срок службы до списания

*Срок службы до списания*  $T_{сл}$  – это календарная продолжительность эксплуатации тепловоза (или его сборочных единиц) до разрушения или другого предельного состояния, после которого восстановление работоспособности, исправности и дальнейшая эксплуатация невозможны или экономически нецелесообразны.

## 2.4. Показатели ремонтпригодности

### 2.4.1. Среднее время восстановления

*Среднее время восстановления*  $t_B$ , ч, определяется по данным о фактическом времени восстановления  $t_{Bi}$ ,  $m$  однотипных восстанавливаемых объектов [8]:

$$\tau_B = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_{Bi}}{m}. \quad (2.10)$$

Показатель используется для характеристики средних затрат времени на выполнение работ по восстановлению работоспособного состояния тепловоза на неплановых ремонтах (без учета времени на ожидание восстановления). Во время восстановления входит и время, затраченное на обнаружение места и причины отказа. Таким образом  $t_B$  характеризует тяжесть последствий отказов и ремонтпригодность отказавшей сборочной единицы. Оно зависит от уровня организации работ в депо по восстановлению тепловоза после отказов, которые, в свою очередь, зависят от квалификации ремонтного персонала, оснащенности депо ремонтным оборудованием, обеспеченности запасными частями и от других субъективных и объективных факторов.

### 2.4.2. Средняя трудоемкость восстановления

*Средняя трудоемкость восстановления*  $\omega_B$ , чел.-ч, определяется по данным о фактической трудоемкости восстановления  $\omega_{Bi}$ ,  $m$  однотипных восстанавливаемых объектов [2]:

$$\omega_B = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_{Bi}}{m}. \quad (2.11)$$

### 2.4.3. Средний простой в ремонте

Средний простой в ремонте  $t_{PEM}$ , ч сут, определяется по данным о фактическом простое в ремонте  $t_{PEM i}$ ,  $m$  однотипных восстанавливаемых объектов [2]:

$$\tau_{PEM} = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_{PEM i}}{m}. \quad (2.12)$$

### 2.4.4. Средняя стоимость ремонта

Средняя стоимость ремонта  $s$ , руб., определяется по данным о фактической стоимости ремонта  $s_i$ ,  $m$  однотипных восстанавливаемых объектов

$$s = \frac{\sum_{i=1}^m s_i}{m}. \quad (2.13)$$

## 2.5. Показатели сохраняемости

### 2.5.1. Срок сохраняемости

Сроком сохраняемости  $T_c$  – называется календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования тепловоза, в течение и после которой сохраняются значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в установленных (нормированных) пределах. Различают сроки сохраняемости до ввода в эксплуатацию и в период эксплуатации. Средний срок сохраняемости для группы из  $N$  тепловозов, являющийся математическим ожиданием срока сохраняемости

$$T_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{cyi}, \quad (2.14)$$

где  $T_{cyi}$  – фактический срок сохраняемости  $i$ -го тепловоза в установленных пределах.

### 2.5.2. Среднее время исправного состояния при хранении

Среднее время исправного состояния при хранении  $T_{xp}$  можно определить как математическое ожидание или среднее арифметическое для  $N$  тепловозов по уравнению

$$T_{\text{xp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{\text{xpi}}, \quad (2.15)$$

где  $T_{\text{xpi}}$  – длительность исправного хранения  $i$ -го объекта.

## 2.6. Комплексные показатели

### 2.6.1. Коэффициент готовности

*Коэффициентом готовности* является вероятность того, что тепловоз окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых его использование по назначению не предусматривается (плановые технические обслуживания и ремонты, запас, резерв, ожидание работы или ремонта, пересылка и т. п.). Коэффициент готовности является показателем, величина которого зависит от частоты отказов и длительности восстановления работоспособности. Он определяется как доля суммарного времени нахождения некоторой совокупности тепловозов (например, парка локомотивного депо) в работоспособном состоянии за некоторый календарный период (год, месяц) по отношению к сумме этого времени и общего времени восстановления после отказов, произошедших в анализируемом периоде [8].

Коэффициент готовности обозначается как  $K_G$  и определяется по формуле

$$K_G = \frac{L_2}{L_2 + T_P}, \quad (2.16)$$

где  $T_P$  – суммарное время простоя тепловозов в ремонте за этот же период. В общее время восстановления входят следующие элементы: время простоя тепловозов на перегоне из-за отказов; время транспортирования до депо или пункта, где проводится ремонт.

По величине коэффициента готовности можно оценить качество выполняемых плановых видов ремонта. Иллюстрацией этого служит зависимость изменения коэффициента готовности от величины наработки, приведенная на рис. 2.5.

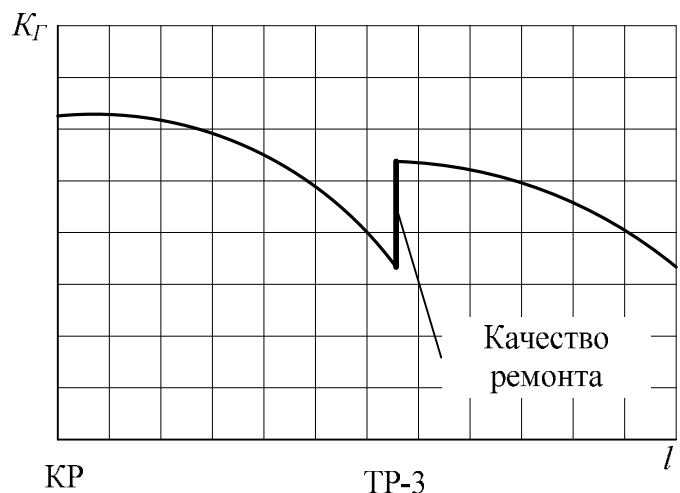


Рис. 2.5. График изменения коэффициента готовности  $K_G$  в зависимости от наработки

### 2.6.2. Коэффициент оперативной готовности

*Коэффициент оперативной готовности*  $K_{OG}$  – это вероятность того, что тепловоз будет работоспособен в произвольный момент времени  $t$  и безотказно проработает заданное время  $t$  [2]:

$$K_{OG}(t, \tau) = K_G(t) \cdot P(\tau). \quad (2.17)$$

### 2.6.3. Коэффициент простоя

*Коэффициент простоя* выражает долю суммарного времени нахождения тепловозов в неработоспособном состоянии.

Коэффициент простоя обозначается  $K_{\Pi}$  и определяется по уравнению

$$K_{\Pi} = \frac{T_P}{L_2 + T_P} = 1 - K_G. \quad (2.18)$$

### 2.6.4. Коэффициент технического использования локомотивов

*Коэффициент технического использования локомотивов (тепловозов)*  $K_{ТИ}$  определяется как отношение суммарного времени эксплуатации парка тепловозов в работоспособном состоянии к годовому фонду времени локомотивного парка депо. Коэффициент технического использования локомотивов (тепловозов) определяется следующим уравнением:

$$K_{ТИ} = \frac{L_2}{T_G} = \frac{L_2}{L_2 + T_P + T_{PE3}}. \quad (2.19)$$

где  $T_{PE3}$  – суммарное время простоя тепловозов в резерве.

### 2.6.5. Коэффициент затрат на техническое обслуживание и ремонт

*Коэффициент затрат на техническое обслуживание и ремонт*  $K_{ТР}$  представляет собой отношение годовых суммарных затрат на техническое обслуживание и ремонт (в расчете на один тепловоз) к первоначальной цене (себестоимости производства) тепловоза

$$K_{ТР} = \frac{E_{ТР.год}}{Ц}. \quad (2.20)$$

### 2.6.6. Ремонтоемкость

Для характеристики затрат на восстановление работоспособности, отнесенных к единице объема выполненной перевозочной работы, используется показатель *ремонтоемкость*  $R$ ,  $\frac{\text{тыс.р}}{\text{тн/км} \cdot \text{брутто}}$ , который определяется по уравнению

$$R = \frac{E_{TP.\text{год}}}{\sum QL}, \quad (2.21)$$

где  $\sum QL$  – объем перевозочной работы, выполненной парком депо за год в расчете на один тепловоз, тн/км·брутто.

Приведенные комплексные показатели надежности определяются: по плановым (проектным) и фактическим данным, полученным в результате эксплуатации тепловозов; по тепловозу в целом и отдельным его узлам, агрегатам; в функции времени эксплуатации, пробега или выполненной перевозочной работы в тонно-километрах брутто.

### 2.7. Пример расчета показателей безотказности

#### *Исходные данные*

В течение пробега от 0 до 600 тыс. км в локомотивном депо произведен сбор информации по отказам ТЭД. При этом количество исправных ТЭД в начале периода эксплуатации составляло  $N_0 = 180$  шт. Суммарное количество отказавших ТЭД за анализируемый период составило  $\sum r(600000) = 60$ . Интервал пробега  $\Delta l$  принять равным 100 тыс. км. При этом количество отказавших ТЭД по каждому участку составило: 2, 12, 16, 10, 14, 6.

#### *Что требуется*

Необходимо рассчитать показатели безотказности и построить их зависимости изменения во времени.

Сначала заполняется таблица исходных данных как показано в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Исходные данные к расчету**

$\Delta l$ , тыс. км	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600
$\sum r(l)$	2	14	30	40	54	60
$\sum r(\Delta l)$	2	12	16	10	14	6

Первоначально по уравнению (2.1) определим для каждого участка пробега величину вероятности безотказной работы. Так, для участка от 0 до 100 и от 100 до 200 тыс. км пробега вероятность безотказной работы составит

$$P(0 \div 100) = 1 - \frac{r(l)}{N_0} = 1 - \frac{2}{180} = 0,989;$$

$$P(100 \div 200) = 1 - \frac{r(l)}{N_0} = 1 - \frac{14}{180} = 0,922.$$

Результаты расчета вероятности безотказной работы  $P(l)$  запишем в виде табл. 2.3.

Таблица 2.3

**Результаты расчета  $P(l)$**

$\Delta l$ , тыс. км	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600
$\sum r(l)$	2	14	30	40	54	60
$P(l)$	0,989	0,922	0,833	0,778	0,7	0,667

Приведем характер изменения вероятности безотказной работы ТЭД в зависимости от пробега (рис. 2.6). Необходимо отметить, что первой точкой на графике, т. е. при пробеге равном 0, величина вероятности безотказной работы примет максимальное значение – 1.

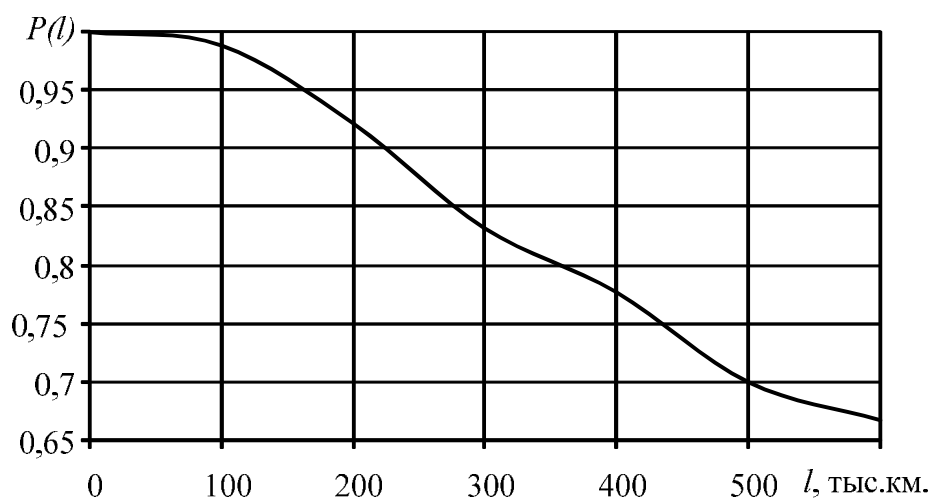


Рис. 2.6. График изменения вероятности безотказной работы  $P(l)$  в зависимости от наработки

Далее, используя зависимость (2.2), произведем расчет вероятности отказа ТЭД

$$Q(0 \div 100) = 1 - P(l) = 1 - 0,989 = 0,011;$$

$$Q(100 \div 200) = 1 - P(l) = 1 - 0,922 = 0,078.$$

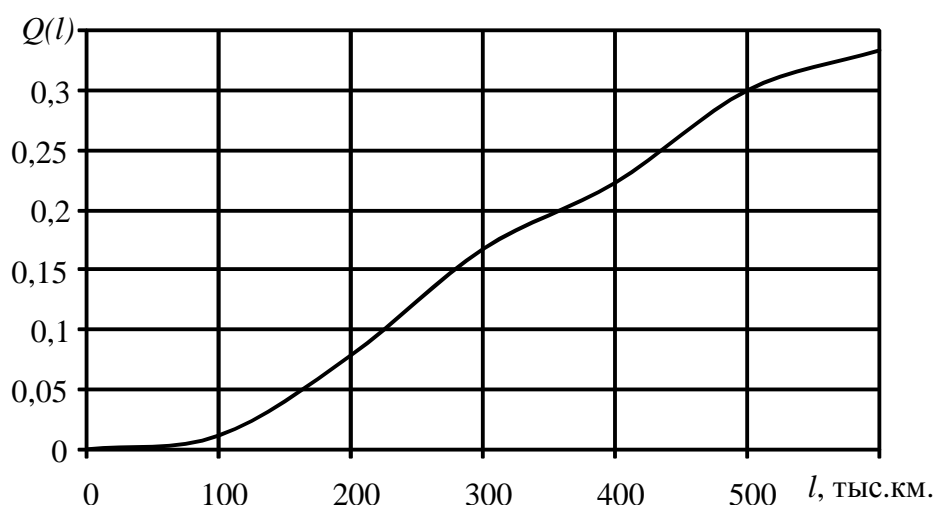
Результаты расчета вероятности отказа  $Q(l)$  представим в виде табл. 2.4.

Таблица 2.4

Результаты расчета  $Q(l)$ 

$\Delta l$ , тыс. км	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600
$\sum r(l)$	2	14	30	40	54	60
$Q(l)$	0,011	0,078	0,167	0,222	0,3	0,333

Приведем характер изменения вероятности отказа ТЭД в зависимости от пробега (рис. 2.7). Необходимо отметить, что первой точкой на графике, т. е. при пробеге равном 0, величина вероятности отказа примет минимальное значение – 0.

Рис. 2.7. График изменения вероятности отказа  $Q(l)$  в зависимости от наработки

Произведем расчет частоты отказов по уравнению (2.3):

$$a(0 \div 100) = \frac{r(\Delta l)}{N_0 \cdot \Delta l} = \frac{2}{180 \cdot 100 \cdot 10^3} = 1,111 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{км}};$$

$$a(100 \div 200) = \frac{r(\Delta l)}{N_0 \cdot \Delta l} = \frac{12}{180 \cdot 100 \cdot 10^3} = 6,667 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{км}}.$$

Результаты расчета частоты отказов  $a(\Delta l)$  представим в виде табл. 2.5.

Таблица 2.5

Результаты расчета  $a(\Delta l)$ 

$\Delta l$ , тыс. км	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600
$\sum r(\Delta l)$	2	12	16	10	14	6
$a(\Delta l), 10^{-7}, 1/\text{км}$	1,111	6,667	8,889	5,556	7,778	3,333

Приведем характер изменения частоты отказов ТЭД в зависимости от пробега (рис. 2.8).

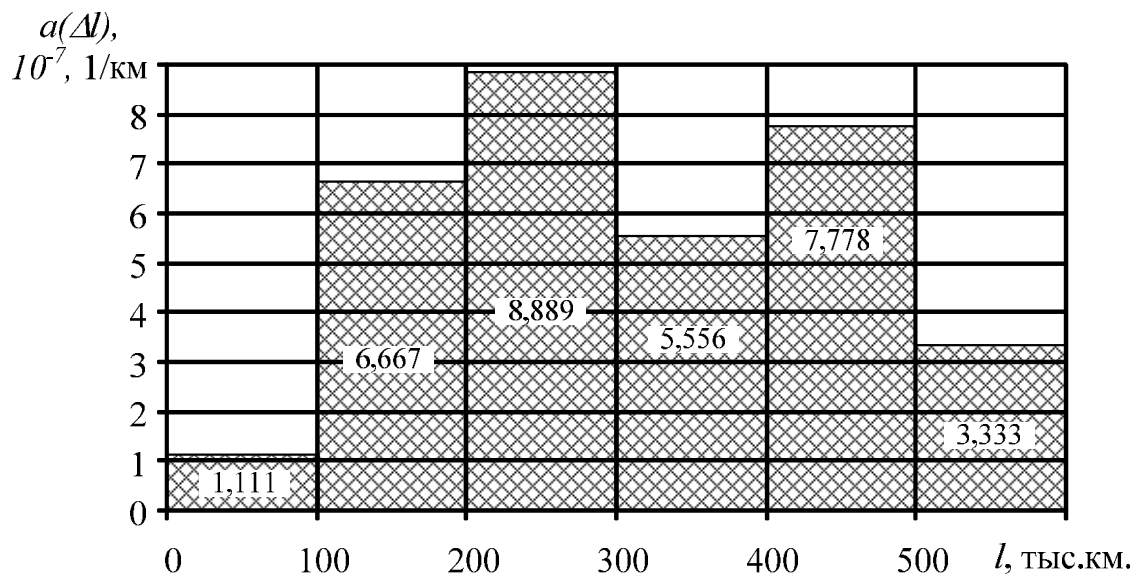


Рис. 2.8. Гистограмма изменения частоты отказов  $a(Dl)$  в зависимости от наработки

Далее по уравнениям (2.4) и (2.5) произведем расчет интенсивности отказов ТЭД в зависимости от наработки.

Первоначально рассчитаем среднее количество работоспособных ТЭД на участке от 0 до 100 тыс. км пробега

$$N_{CP} = \frac{N(0) + N(0 + 100)}{2} = \frac{180 + (180 - 2)}{2} = 179.$$

Тогда интенсивность отказов на участке 0–100 тыс. км будет

$$\lambda(0 \div 100) = \frac{r(\Delta l)}{N_{CP} \cdot \Delta l} = \frac{2}{179 \cdot 100 \cdot 10^3} = 1,117 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{км}}.$$

Аналогичным образом определим величину интенсивности отказов для интервала 100–200 тыс. км

$$N_{CP} = \frac{N(100) + N(100 + 200)}{2} = \frac{178 + (178 - 12)}{2} = 172;$$

$$\lambda(100 \div 200) = \frac{r(\Delta l)}{N_{CP} \cdot \Delta l} = \frac{12}{172 \cdot 100 \cdot 10^3} = 6,977 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{км}}.$$

Результаты расчета интенсивности отказов  $I(\Delta l)$  представим в виде табл. 2.6.



Таблица 2.6

Результаты расчета  $I(Dl)$ 

$\Delta l$ , тыс. км	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600
$\sum r(\Delta l)$	2	12	16	10	14	6
$I(\Delta l)$ , $10^{-7}$ , 1/км	1,111	6,667	8,889	5,556	7,778	3,333

На рис. 2.9 представлена зависимость изменения интенсивности отказов от наработки.

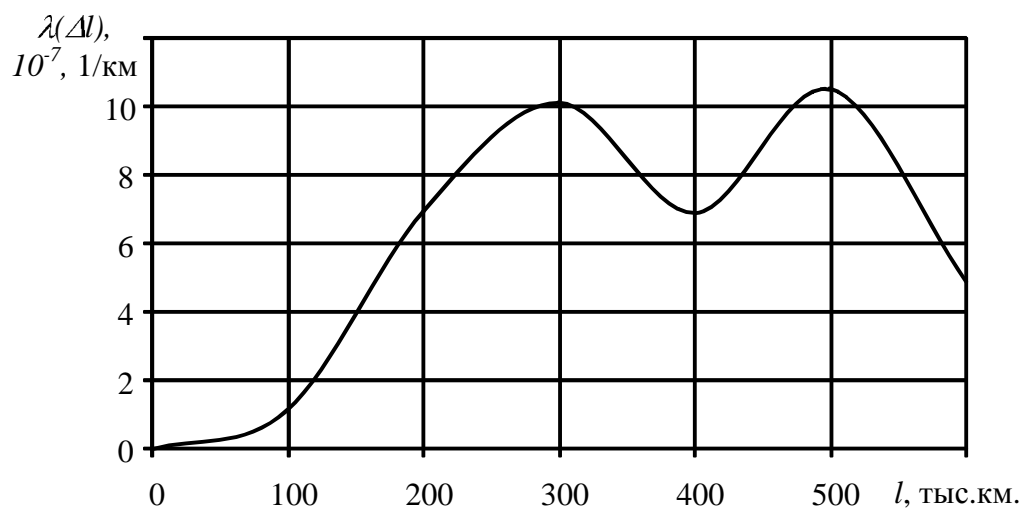


Рис. 2.9. График изменения интенсивности отказов  $I(Dl)$  в зависимости от наработки

По уравнениям (2.6) и (2.7) определим среднюю наработку до отказа и значение параметра потока отказов:

$$L_1 = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{\sum_{i=1}^N r_i} = \frac{600000}{60} = 100 \cdot 10^3 \text{ км};$$

$$\omega_{\text{ср}} = \frac{1}{L_1} = \frac{1}{100 \cdot 10^3} = 0,01 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{км}}.$$

Систематизируем полученные результаты в виде табл. 2.7.

Таблица 2.7

### Результаты расчетов показателей безотказности

$\Delta l$ , тыс. км	0–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600
$\sum r(l)$	2	14	30	40	54	60
$\sum r(\Delta l)$	2	12	16	10	14	6
$P(l)$	0,989	0,922	0,833	0,778	0,7	0,667
$Q(l)$	0,011	0,078	0,167	0,222	0,3	0,333
$a(\Delta l)$ , $10^{-7}$ , 1/км	1,111	6,667	8,889	5,556	7,778	3,333
$I(\Delta l)$ , $10^{-7}$ , 1/км	1,111	6,667	8,889	5,556	7,778	3,333

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение показателям надежности. Что позволяет выполнить их расчет?
2. Перечислите основные единичные показатели надежности таких свойств надежности, как безотказность, сохраняемость, ремонтпригодность, долговечность.
3. Какие показатели надежности относятся к комплексным показателям?
4. Дайте определения показателям надежности безотказности.
5. Дайте определения показателям надежности ремонтпригодности.
6. Назовите показатель надежности который можно ориентировочно принять за срок ремонта или замены узла.

## 3. ПЛАНЫ НАБЛЮДЕНИЙ

### 3.1. Общие сведения

Показатели надежности тепловозов являются случайными величинами, и их определение всегда базируется на использовании статистических эксплуатационных данных. Для этого применяют статистические методы расчета точных и интервальных оценок показателей на основе выборочных данных, полученных в результате наблюдений за работой объектов.

В большинстве случаев безотказность тепловозов и их сборочных единиц является высокой, и для получения качественной исходной информации требуется большая продолжительность наблюдений или большой объем выборки. Расчет оценок показателей надежности в связи с этим во многом определяется видами плана наблюдений (испытаний) и закона распределения наработки до отказа [3].

В зависимости от конкретных условий и поставленных задач ГОСТ 17510-72 «Надежность в технике. Система сбора и обработки ин-

формации. Планирование наблюдений» определяет применение следующих планов:  $[N, U, N]$ ;  $[N, U, T]$ ;  $[N, U, r]$ ;  $[N, R, T]$ ;  $[N, R, r]$ , где  $N$  – количество изделий, поставленных под наблюдение (число тепловозов);  $U$  – обозначение планов, в которых отказавшие изделия (тепловозы) не заменяются новыми;  $T$  – установленная наработка или продолжительность наблюдений;  $R$  – обозначение планов, в которых отказавшие объекты заменяются новыми или отремонтированными;  $r$  – число отказов или предельных состояний изделий, до возникновения которых ведутся наблюдения.

Обычно для промышленных изделий наработка до отказа оценивается в часах (например, моторесурс дизеля), но применительно к железнодорожному транспорту, для оценки надежности тепловозов, используется пробег, т. е. расстояние, пройденное тепловозом в рабочем состоянии. Поэтому в планах испытаний на надежность тепловозов для оценки продолжительности наблюдений пользуются пробегом  $L$ . Таким образом, планы наблюдений за надежностью тепловозов могут быть представлены в виде:  $[N, U, N]$ ;  $[N, U, L]$ ;  $[N, U, r]$ ;  $[N, R, L]$ ;  $[N, R, r]$ .

Далее рассмотрим каждый из приведенных планов наблюдений применительно к условиям эксплуатации тепловозов [6].

### 3.2. План наблюдений $[N, U, N]$

План наблюдений  $[N, U, N]$  или полный план, означает, что под наблюдение взята партия из  $N$  тепловозов или их сборочных единиц и, что испытания проводятся до отказа всех объектов, при этом отказавшие объекты не заменяются новыми.

Таким образом, при полном плане определяют наработки до отказа неремонтируемых изделий. Если объекты ремонтируемые, то при таком плане выявляют наработки только до первого отказа, затем их исключают из опыта. На рис. 3.1 показана модель эксплуатации пяти объектов при плане  $[N, U, N]$ .

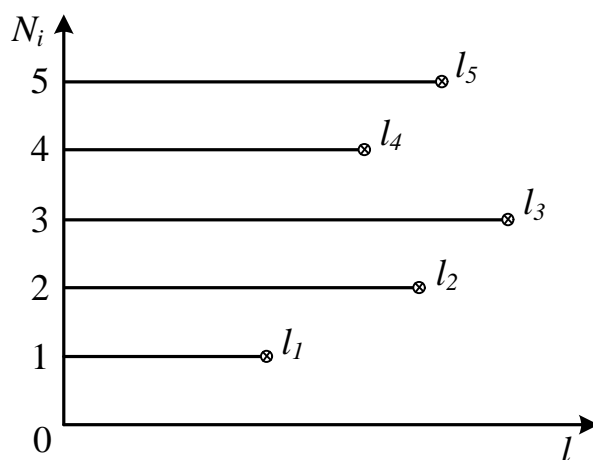


Рис. 3.1. Модель плана наблюдений  $[N, U, N]$

### 3.3. План наблюдений $[N, U, L_0]$

В связи с применением для тепловозов системы планово-предупредительных ремонтов широкое применение имеет план с фиксированной наработкой  $L_0$ , т. е.  $[N, U, L_0]$ .  $L_0$  – в общем случае – установленный пробег, после которого производится плановое восстановление работоспособности объекта или он заменяется новым.

Для тепловоза и его сборочных единиц выбор  $L_0$  зависит от вида объекта и характера отказа. В качестве  $L_0$  может быть использован пробег между заводскими ремонтами или от заводского ремонта (изготовления) до ТР-3, а также пробеги между ТО-3, ТР-1, ТР-2.

При плане  $[N, U, L_0]$  наблюдается состояние всех  $N$  объектов в течение пробега  $L_0$ . При первом же отказе  $i$ -го объекта с наработкой  $l_i < L_0$  дальнейшее наблюдение за объектом прекращается. Кроме того, в данные о результатах наблюдений не включаются сведения об объектах, которые не отказали за пробег  $L_0$  или были поставлены в ремонт с меньшим, чем  $L_0$  пробегом. На рис. 3.2 изображена модель плана наблюдений  $[N, U, L_0]$ .

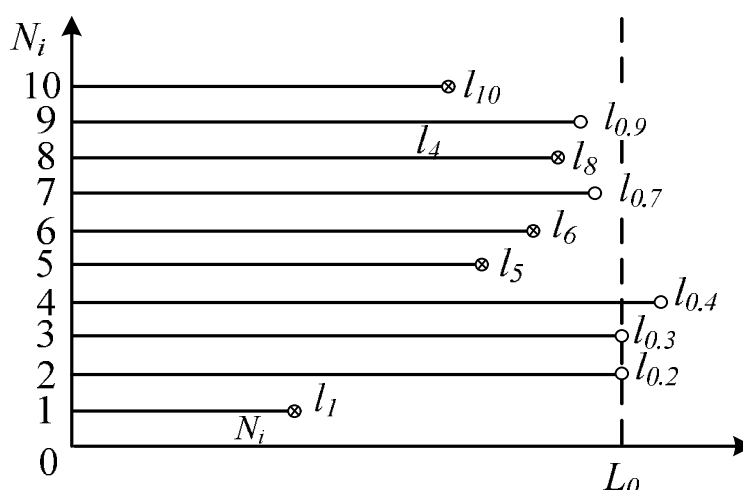


Рис. 3.2. Модель плана наблюдений  $[N, U, L_0]$

По приведенному примеру на рис. 3.2 можно принять к учету данные о пробегах до отказа  $l_1, l_5, l_6, l_8, l_{10}$ . Объекты 7 и 9 из наблюдений исключены, так как они были поставлены на плановый ремонт с пробегом меньше  $L_0$ . Данные о пробегах объектов 2, 3 и 4 могут быть использованы как дополнительные сведения для определения параметров усеченной выборки. План наблюдений  $[N, U, L_0]$  может быть использован как для ремонтируемых объектов, так и для неремонтируемых. Отличие состоит в том, что отремонтированный после первого отказа объект в дальнейшем из наблюдений исключается.

### 3.4. План наблюдений $[N, U, r]$ и $[N, R, r]$

План наблюдений  $[N, U, r]$  можно охарактеризовать следующим образом: под наблюдение поставлено  $N$  объектов, отказавшие изделия новыми не заменяются, наблюдения продолжают до накопления данных об отказах или некоторых предельных состояниях.

На рис. 3.3 представлена схема модели наблюдений  $[N, U, r]$ , где наработки расположены в порядке возрастания. Как только у объекта  $N_{i=r}$  произойдет отказ, наблюдение прекращают, хотя  $N-r$  объектов еще не имели отказов и продолжают работать. Последующая после первого отказа наработка каждого из  $r$  отказавших до  $l < L_r$  объектов не учитывается, даже если они после ремонта вновь используются в эксплуатации. В практике расчетов показателей надежности тепловозов этот план используется редко.

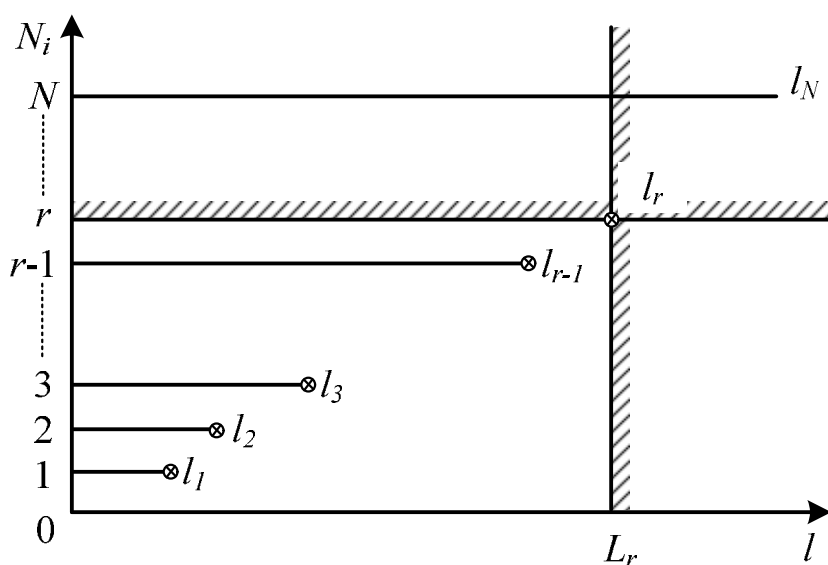


Рис. 3.3. Модель плана наблюдений  $[N, U, r]$

План наблюдений  $[N, R, r]$  показывает, что взятые под наблюдения  $N$  объектов после отказа заменяются новыми (или ремонтируются за достаточно малое время), наблюдения ведутся до получения  $r$  отказов. Если время ремонта велико, используется план  $U$ . Как и план  $[N, U, r]$ , план  $[N, R, r]$  так же достаточно редко используется при расчете показателей надежности тепловозов.

### 3.5. План наблюдений $[N, R, L_0]$

Отдельно рассмотрим план наблюдений  $[N, R, L_0]$ , так как он является наиболее удобным применительно к тепловозам, исходя из условий обслуживания и ремонта, минимальных затрат времени на проведение эксперимента. Данный план наблюдений является достаточно важным для

определения показателей восстанавливаемых объектов. При плане наблюдений  $[N, R, L_0]$  наблюдениям подлежат  $N$  объектов, отказавшие объекты заменяют новыми или восстанавливают, наблюдения прекращают по истечении пробега  $L_0$ . Время восстановления работоспособности объекта (ремонт, замена) должно быть достаточно мало, чтобы не повлиять на результаты определения оценок показателей надежности. На рис. 3.4 показана модель плана наблюдений  $[N, R, L_0]$ .

Статистическая информация о наработках при этом плане может быть трех видов:

- 1) наработка  $i$ -го объекта до первого отказа (например,  $l_{1.1}, l_{2.1}, l_{N.1}$ );
- 2) наработка  $i$ -го объекта до отказа после восстановления работоспособности или замены, например  $l_{1.2}, l_{N.2}$ ;
- 3) наработка до отказа после начала работы или после ремонта неизвестна, но она или не меньше  $L_0$  (наработка  $l_{3.1}$ ), или меньше  $L_0$  (наработки  $l_{1.3}, l_{2.2}, l_{N.3}$ ).

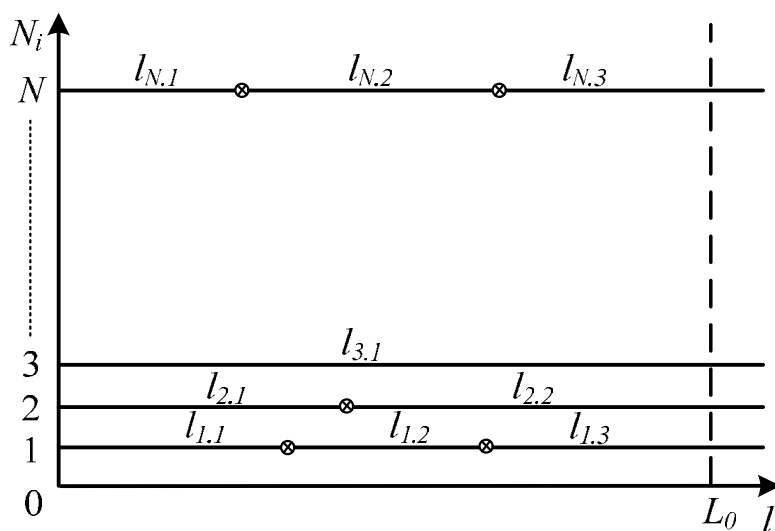


Рис. 3.4. Модель плана наблюдений  $[N, R, L_0]$

Для расчета параметров закона распределения до отказа могут быть использованы в равной мере наработки первых двух видов, если изделия заменяются новыми, а также при полном восстановлении всех рабочих параметров после ремонта. Информация о наработках третьего вида также может быть частично использована.

Выбор того или иного плана наблюдений зависит от многих факторов: вида объектов, номенклатуры показателей, подлежащих оценке по результатам наблюдений, условий эксплуатации и др. Важным также является обеспечение достаточного качества первичной информации, ее объективности, полноты и точности сведений.

### 3.6. Определение минимального объема наблюдений

Объем проводимых наблюдений прямо влияет на точность оценки надежности изделия: чем выше объем наблюдений тем выше точность оценки. Поэтому в практических условиях необходимо определять минимальный объем наблюдений с учетом относительной ошибки и доверительной вероятности.

Для наиболее приемлемого к условиям локомотивного депо плана наблюдения  $[N, R, L_0]$  продолжительность эксперимента определяется следующим выражением [4]:

$$T = \frac{\chi \cdot t_{\text{ср}}}{N}, \quad (3.1)$$

где  $\chi$  – коэффициент, который выбирается в зависимости от относительной ошибки  $\delta$  и доверительной вероятности  $b$  по табл. 3.1;  $t_{\text{ср}}$  – среднее значение показателя надежности.

Таблица 3.1

Значения коэффициента  $\chi$

Относительная ошибка $\delta$	Значение коэффициента $\chi$ при значениях доверительной вероятности $b$			
	0,8	0,9	0,95	0,99
0,05	331	684	1052	2625
0,1	88	217	346	714
0,15	56	114	170	358
0,2	29	59	116	232

**Пример.** Требуется определить величину минимального объема наблюдений за работой 10 объектов. При этом значение относительной ошибки составляет 0,15, а доверительной вероятности – 0,9. Известно, что средняя наработка до отказа составляет 100 часов.

Рассчитаем величину минимального объема наблюдений по формуле (3.1), заранее определив величину коэффициента  $\chi$  по данным табл. 3.1:

$$T = \frac{114 \cdot 100}{10} = 1140 \text{ ч.}$$

Если расчетное значение  $T$  меньше выбранного заранее срока, то точность эксперимента можно считать достаточной, исходя из указанных значений  $\delta$  и  $b$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего необходимы планы наблюдений?
2. Назовите известные вам планы наблюдений.
3. Какой из существующих планов наблюдений является наиболее приемлемым к локомотивам? Обоснуйте ответ.
4. Объясните необходимость определения минимального плана наблюдений.
5. Каким образом производится расчет минимального объема наблюдений?

## 4. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

### 4.1. Общие сведения

Количественное определение надежности связано с природой возникновения отказа, которая, как уже указывалось, является результатом случайного совпадения ряда неблагоприятных факторов. Это положение приводит к заключению, что отказ является случайным событием. Случайность отказа состоит в случайности его наступления, т. е. во времени его возникновения и месте расположения события.

При определении количественного значения надежности вместо случайных событий пользуются случайными величинами, которые в результате опыта могут принять то или иное значение, причем неизвестно заранее какое именно. Таким образом, наиболее полной характеристикой любой случайной величины является закон распределения.

*Законом распределения случайной величины* называется всякое соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями.

Законы распределения времени между отказами позволяют достаточно просто определять все основные количественные характеристики надежности. В действительных условиях содержания систем время между отказами простейших элементов и сложных систем подчиняется ряду определенных законов распределения: экспоненциальному, нормальному, Вейбулла–Гнеденко, и др.

В соответствии с ОСТ 32.70-96 «Тепловозы. Система сбора и обработки информации о надежности с мест эксплуатации» рекомендуемые законы распределения в зависимости от объекта контроля и характера отказа представлены в табл. 4.1 [10].

Рассмотрим наиболее часто используемые для расчета надежности законы распределения, характеризующие непрерывные случайные величины.



Таблица 4.1

**Рекомендуемые законы распределения**

Объект контроля	Наиболее характерный вид и (или) причина отказа	Закон распределения
Тепловоз, агрегат	Смешанный	Экспоненциальный
Деталь	Износ	Нормальный
	Старение	Нормальный
	Усталостное разрушение	Нормальный
	Контактная усталость (подшипники)	Вейбулла–Гнеденко
	Разрушение от перегрузки	Экспоненциальный
	Задиры	Экспоненциальный
	Прогары	Вейбулла–Гнеденко
	Коррозия	Нормальный
	Смешанный	Экспоненциальный

**4.2. Экспоненциальный закон распределения**

Экспоненциальный закон достаточно точно описывает надежность узлов при внезапных отказах, имеющих случайный характер. Попытки применить его для других типов и случаев отказов, особенно постепенных, вызванных износом и изменением физико-химических свойств элементов показали его недостаточную приемлемость. Вероятность безотказной работы определяется по уравнению

$$P(l) = e^{-\lambda l}. \quad (4.1)$$

Зависимости изменения вероятности безотказной работы от пробега для экспоненциального закона распределения показана на рис. 4.1.

В свою очередь средняя наработка до отказа определяется как

$$L_1 = \frac{1}{\lambda}. \quad (4.2)$$

Дисперсия наработки до отказа (на отказ) определяется по уравнению

$$D(l) = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (4.3)$$

Среднеквадратичное отклонение наработки до отказа (на отказ)

$$\sigma(l) = \sqrt{D(l)} = \frac{1}{\lambda} = L_1. \quad (4.4)$$

Таким образом, равенство  $\sigma(l) = L_1$  – характерный признак экспоненциального распределения.

Необходимо отметить, что величина интенсивности отказа при экспоненциальном распределении является величиной постоянной и не зависящей от времени или наработки объекта  $\lambda = \text{const}$ .

Тогда вероятность безотказной работы объекта на интервале пробега  $l=L_1$  при экспоненциальном законе распределения составит

$$P(l) = e^{-\lambda L_1} = e^{-\frac{L_1}{L_1}} = e^{-1} \cong 0,368. \quad (4.5)$$

Таким образом, средняя наработка до отказа это наработка, в течение которой вероятность безотказной работы достигнет величины 0,368.

Частота отказов для экспоненциального закона распределения будет

$$a(l) = \lambda \cdot e^{-\lambda l}. \quad (4.6)$$

Зависимости изменения частоты отказов и интенсивности отказов от пробега для экспоненциального закона распределения показаны на рис. 4.2.

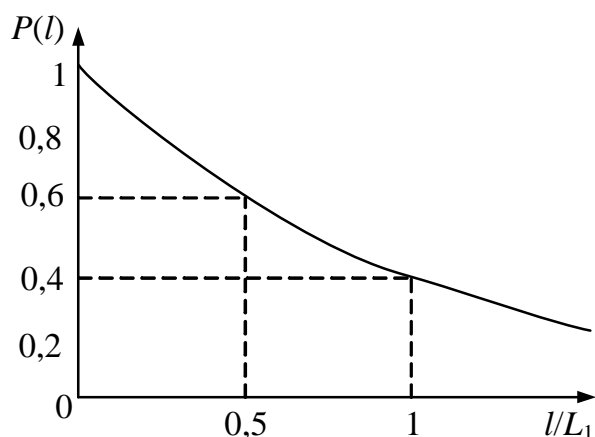


Рис. 4.1. Функция  $P(l)$  для экспоненциального закона распределения

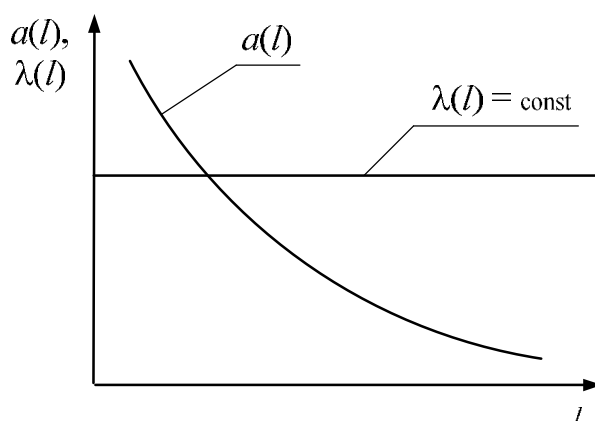


Рис. 4.2. Функции  $a(l)$  и  $\lambda(l)$  для экспоненциального закона распределения

**Пример.** В результате испытания десяти топливных насосов высокого давления получены наработки их до отказа: 400, 440, 500, 600, 670, 700, 800, 1200, 1600, 1800 ч. Предполагая, что наработка до отказа топливных насосов подчиняется экспоненциальному закону распределения, необходимо оценить величину интенсивности отказов  $\lambda$ , а также рассчитать вероятность безотказной работы за первые 500 ч и вероятность отказа в промежутке времени между 800 и 900 ч работы дизеля.

Во-первых, определим величину средней наработки топливных насосов до отказа по уравнению (2.6):

$$L_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{10} l_i = \frac{400 + 440 + 500 + 600 + 670 + 700 + 800 + 1200 + 1600 + 1800}{10} = 871 \text{ ч.}$$

Затем рассчитываем величину интенсивности отказов  $\lambda$  по уравнению (4.2):

$$\lambda = \frac{1}{L_1} = \frac{1}{871} = 1,15 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{ч}}.$$

Величина вероятности безотказной работы топливных насосов при наработке 500 ч по формуле (4.1) составит

$$P(500) = e^{-\lambda l} = e^{-1,15 \cdot 10^{-3} \cdot 500} = 0,563.$$

Вероятность отказа в промежутке между 800 и 900 ч работы насосов имеет вид:

$$\begin{aligned} Q(900) - Q(800) &= [1 - e^{-\lambda l_2}] - [1 - e^{-\lambda l_1}] = \\ &= [1 - e^{-1,15 \cdot 10^{-3} \cdot 900}] - [1 - e^{-1,15 \cdot 10^{-3} \cdot 800}] = 0,645 - 0,601 = 0,044. \end{aligned}$$

#### 4.3. Нормальный закон распределения

Нормальный закон распределения хорошо описывает отказы, возникающие в элементах конструкции тепловозов в процессе изнашивания, усталости и коррозии деталей, работающих на номинальных (расчетных) режимах нагружения.

Вероятность безотказной работы при нормальном законе распределения определяется по уравнению

$$P(l) = 1 - F\left(\frac{l - L_1}{\sigma_T}\right) \quad (4.7)$$

где  $\sigma_T$  – дисперсия;  $F$  – интеграл Лапласа.

Зависимость изменения вероятности безотказной работы от наработки показана на рис. 4.3.

Частота отказов и интенсивность отказов для нормального распределения рассчитываются по уравнениям:

$$a(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_T^2}} \exp\left(-\frac{(l - L_1)^2}{2\sigma_T^2}\right) \quad (4.8)$$

$$\lambda(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_T^2}} \exp\left(-\frac{(l - L_1)^2}{2\sigma_T^2}\right) \left[1 - F\left(\frac{l - L_1}{\sigma_T}\right)\right]^{-1}. \quad (4.9)$$

Зависимости частоты отказов и интенсивности отказов для нормального закона распределения показаны на рис. 4.4.

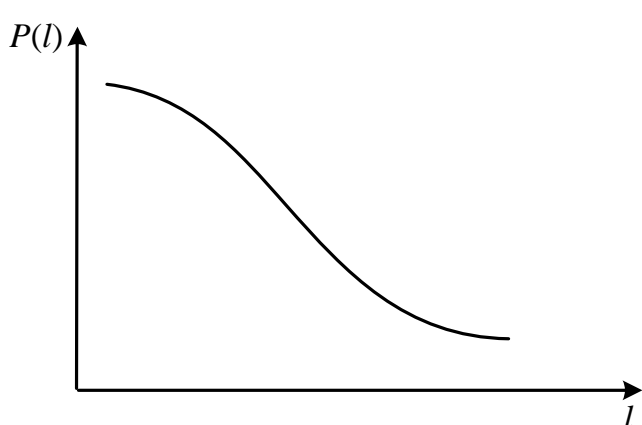


Рис. 4.3. Функции  $P(l)$  для нормального закона распределения

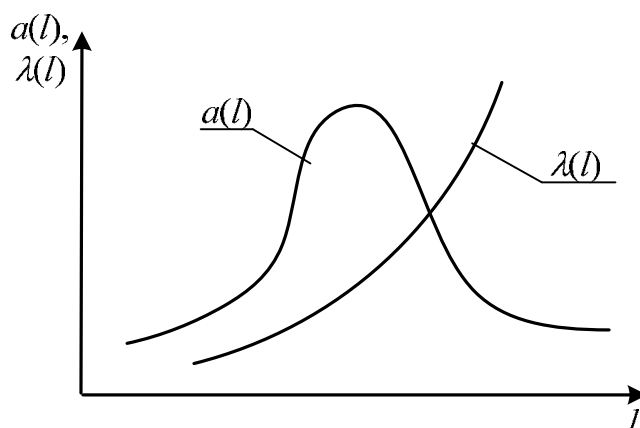


Рис. 4.4. Функции  $a(l)$  и  $l(l)$  для нормального закона распределения

#### 4.4. Закон распределения Вейбулла–Гнеденко

Закон распределения Вейбулла–Гнеденко получил широкое распространение и используется применительно к системам, состоящим из рядов элементов, соединенных последовательно с точки зрения обеспечения безотказности системы. Например, системы, обслуживающие дизель-генераторную установку: смазки, охлаждения, питания топливом, воздухом и т. д.

Распределение Вейбулла–Гнеденко обычно задается двухпараметрической функцией частоты отказов

$$a(l) = \frac{b}{a} \left( \frac{l}{a} \right)^{b-1} \exp \left[ - \left( \frac{l}{a} \right)^b \right], \quad (4.10)$$

где  $b$  – параметр формы;  $a$  – параметр масштаба распределения. Иногда параметр масштаба задается в виде  $a = a^{-b}$ . В этом случае выражение (4.10) преобразуется к виду:

$$a(l) = \frac{b \cdot l^{b-1}}{a^b} \exp \left[ - \left( \frac{l}{a} \right)^b \right]. \quad (4.11)$$

Зависимость частоты отказов представлена на рис. 4.5.

Функция распределения вероятности безотказной работы определяется следующим образом:

$$P(l) = \exp \left[ - \left( \frac{l}{a} \right)^b \right]. \quad (4.12)$$

Вид функции вероятности безотказной работы для распределения Вейбулла–Гнеденко показан на рис. 4.6.

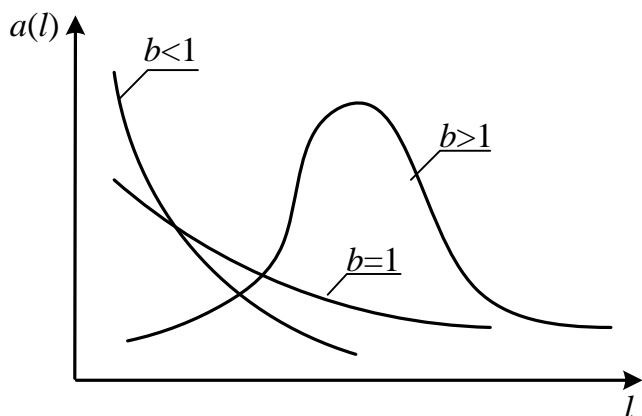


Рис. 4.5. Функция  $a(l)$  для распределения Вейбулла–Гнеденко

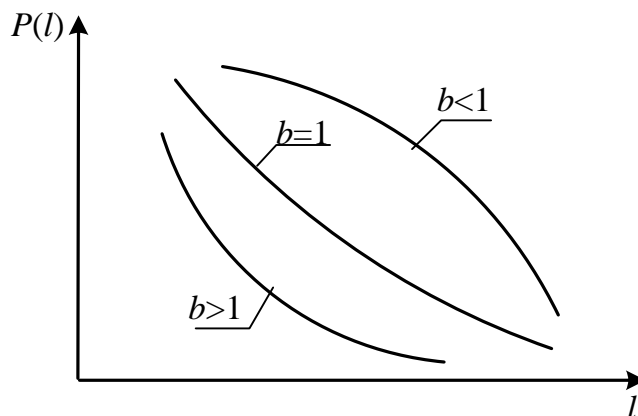


Рис. 4.6. Функция  $P(l)$  для распределения Вейбулла–Гнеденко

### Интенсивность отказов

$$\lambda(l) = \frac{b}{a} \left( \frac{l}{a} \right)^{b-1}. \quad (4.13)$$

### Наработка до отказа

$$L_1 = a\Gamma \left( 1 + \frac{1}{b} \right), \quad (4.14)$$

где  $\Gamma$  – табулированная гамма-функция.

Зависимость интенсивности отказов для распределения Вейбулла–Гнеденко представлена на рис. 4.7.

**Пример.** Время простоя тепловозов в неплановых ремонтах по вине вспомогательного оборудования подчиняется закону распределения Вейбулла–Гнеденко с параметрами  $b = 2$  и  $a = 46$ . Требуется определить вероятность выхода тепловозов из неплановых ремонтов после 24 ч простоя и время простоя, в течение которого работоспособность будет восстановлена с вероятностью 0,95.

Из уравнения (4.12) найдем вероятность восстановления работоспособности локомотива после простоя его в депо в течение суток

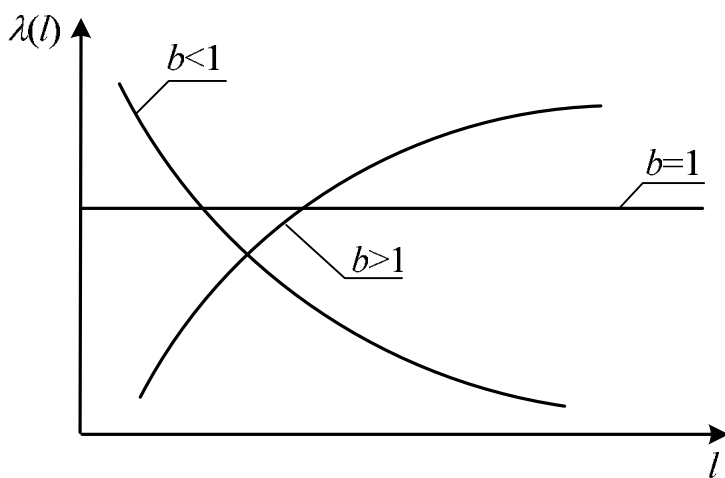


Рис. 4.7. Функция  $\lambda(l)$  для распределения Вейбулла–Гнеденко

$$Q(24) = 1 - P(24) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{24}{46} \right)^2 \right] = 1 - 0,76 = 0,24.$$

Для определения времени восстановления работоспособности локомотива с заданной величиной доверительной вероятности также используем выражение (4.12)

$$Q(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{46} \right)^2 \right] = 0,95; \quad \exp \left[ - \left( \frac{x}{46} \right)^2 \right] = 0,05;$$

$$-2,99 = \left( \frac{x}{46} \right)^2; \quad x = 79,5 \text{ ч} \approx 3,3 \text{ сут.}$$

#### 4.5. Закон распределения Рэлея

Закон распределения Рэлея используется в основном для анализа работы элементов, имеющих ярко выраженный эффект старения (элементы электрооборудования, различного рода уплотнения, шайбы, прокладки, изготовленные из резиновых или синтетических материалов). Функция частоты отказов в этом случае определяется выражением

$$a(l) = \frac{2l}{S^2} \exp \left[ - \left( \frac{l}{S} \right)^2 \right], \quad (4.15)$$

где  $S$  – параметр распределения.

Количественные характеристики безотказности в случае закона распределения Рэлея имеют вид:

– интенсивность отказов

$$\lambda(l) = \frac{2l}{S^2}, \quad (4.16)$$

– вероятность безотказной работы

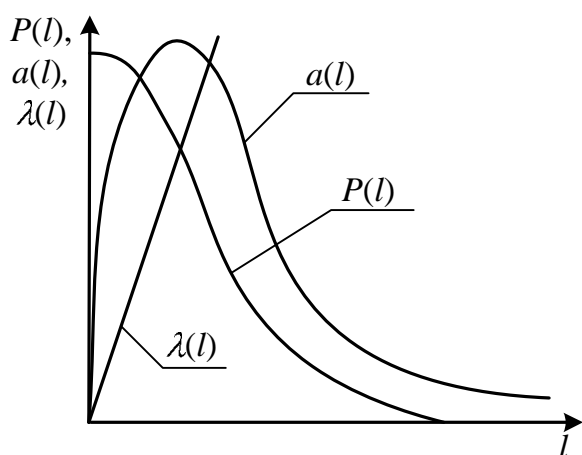


Рис. 4.8. Функции  $P(l)$ ,  $a(l)$ ,  $\lambda(l)$  для распределения Рэлея

$$P(l) = \exp \left[ - \left( \frac{l}{S} \right)^2 \right], \quad (4.17)$$

наработка до первого отказа

$$L_1 = \frac{\sqrt{\pi} S}{2}. \quad (4.18)$$

Характер изменения во времени функций безотказности для закона распределения Рэлея показан на рис. 4.8.

**Пример.** Для величины наработки 120 тыс. км требуется определить вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и среднюю наработку до первого отказа катушки электромагнитного контактора. Известно, что наработки контакторов до отказа по параметрам старения изоляции катушек можно описать функцией распределения Рэлея с параметром  $S = 260$  тыс. км.

По выражениям (4.16)–(4.18) находим:

$$P(120 \cdot 10^3) = \exp \left[ - \left( \frac{120 \cdot 10^3}{260 \cdot 10^3} \right)^2 \right] = 0,81;$$

$$\lambda(120 \cdot 10^3) = \frac{2 \cdot 260 \cdot 10^3}{(260 \cdot 10^3)^2} = 3,5 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{км}}; \quad L_1 = \frac{\sqrt{\pi} \cdot 260 \cdot 10^3}{2} = 230 \cdot 10^3 \text{ км}.$$

#### 4.6. Определение закона распределения

При исследовании надежности тепловоза, его узлов и деталей возникает необходимость определения вида и аналитического выражения закона распределения длительности работы (наработки) до отказа. Имея статистические данные об отказах узла, можно определить теоретический закон распределения пробега до отказа. В теории надежности используется несколько методов определения законов распределения и расчета оценок их параметров по статистическим данным: метод моментов; метод разделяющих разбиений; графический метод.

Наиболее приемлемым для условий локомотивных депо является *метод моментов*, так как он применяется в случае, если известны реализации  $l_1, l_2, l_3 \dots l_n$  наработки до отказа  $n$  узлов. Для получения вариационного ряда их располагают в порядке возрастания. Далее диапазон пробегов  $l_n - l_1$  делят на  $k$  интервалов  $\Delta l$  (желательно одинаковой величины)

$$\Delta l \cong \frac{l_{\max} - l_{\min}}{1 + 3,3 l_g n}, \quad (4.19)$$

где  $l_{\max}, l_{\min}$  – соответственно наибольшее и наименьшее значение в вариационном ряду.

Затем подсчитывают число случаев попадания пробега до отказа  $n$  в каждый интервал, введя условную единицу  $x_i$ :

$$x_i = \frac{l_i}{\Delta l}, \quad (4.20)$$

где  $l_i$  – значение пробега для середины  $i$ -го интервала.

По формуле

$$W(x_i) = \frac{\Delta n_i}{n}, \quad (4.21)$$

определяется частность отказов в каждом интервале пробега.

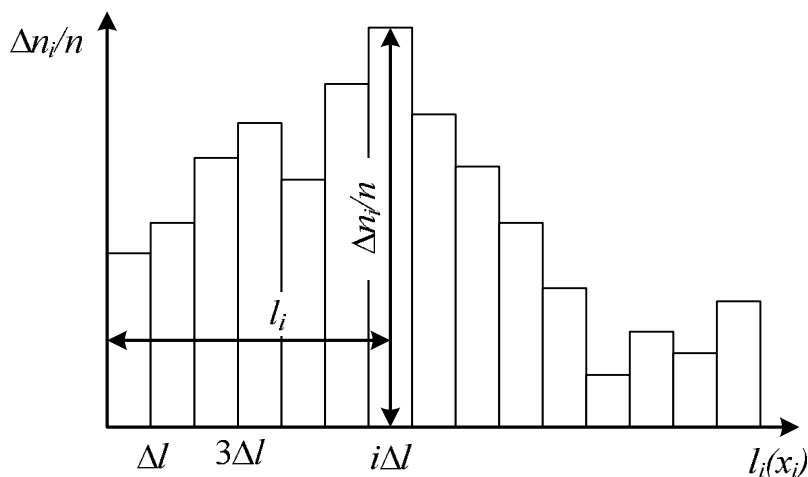


Рис. 4.9. Пример гистограммы частности

По форме построенной гистограммы частности (рис. 4.9) можно выдвинуть гипотезу о том, какой из известных теоретических законов распределения ближе всего по форме подходит к статистическим данным.

Параметры, входящие в аналитическое выражение закона распределения определяются приравниванием моментов теоретического

распределения к соответствующим моментам статистического распределения. Для однопараметрических законов (экспоненциальный, Рэлея) приравнивается математическое ожидание; для двухпараметрических законов (нормальный, Вейбулла–Гнеденко), кроме этого, приравниваются дисперсии или среднеквадратические отклонения.

Из полученных таким образом уравнений находят неизвестные параметры предполагаемых законов распределения. Точность соответствия теоретического закона распределения статистическому распределению проверяют критериями согласия (Колмогорова, Пирсона и др.).

Наиболее распространенным является критерий  $\chi^2$  Пирсона, определяемый по зависимости

$$c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta n_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (4.22)$$

где  $i = 1, 2, \dots, k$  – интервалы группирования случайной величины  $\chi$  в выборочной совокупности объемом  $n$  значений;  $\Delta n_i$  – частота попадания случайной величины в  $i$ -й интервал;  $pi$  – теоретическая вероятность попадания в  $i$ -й интервал.

При расчете критерия  $\chi^2$  используют эмпирические (опытные) выборочные данные  $\Delta n_i$  и теоретические частоты  $np_i$ , найденные по теоретической формуле закона. Количество интервалов группирования определяет число степеней свободы  $r = k - c - 1$ , где  $c$  – число неизвестных параметров за-



кона. По величине и уровню значимости  $q$  находят величины  $\chi_q^2$ . И если гипотеза верна, то при достаточно большом  $n$

$$P\{\chi^2 > \chi_q^2\} = q. \quad (4.23)$$

Следовательно, если найденная по опытным данным величина  $\{\chi^2 > \chi_q^2\}$  при выбранном уровне значимости, то гипотеза о законе распределения не противоречит опытным данным. Для критерия  $\chi^2$  установлены весьма жесткие условия применения:  $n \geq 200$  и  $\Delta n_i \geq 18$ .

*Метод разделяющих разбиений* удобно применять в тех случаях, когда  $n$  элементов, включенных в работу, подвергаются проверке через некоторый пробег  $L_n$  (например, до планового ремонта). Если за этот пробег отказало  $m_1$  элементов, то отношение  $m_1/n$  есть значение функции распределения  $F(l=L_n)$ .

При двухпараметрическом законе распределения, кроме этого, необходимо еще знать число отказавших элементов  $m_2$  за пробег  $2L_n$ . Значения функции распределения вычисляются по формулам:

$$F(L_n) = \frac{m_1}{n}, \quad (4.24)$$

$$F(2L_n) = \frac{m_1}{n} + \frac{m_2}{n - m_1} \left( 1 - \frac{m_1}{n} \right). \quad (4.25)$$

Приравнивая выражение функции теоретического распределения при  $l_1=L_n$  и  $l_2=2L_n$  к соответственным значениям, вычисленным по формулам (4.24) и (4.25), можно определить параметры закона распределения.

*Графические методы* определения законов распределения и их параметров, как правило, предполагают применение так называемых вероятностных бумаг. Вероятностные бумаги разрабатываются для каждого вида закона распределения. Они представляют собой прямоугольную систему координат с особыми масштабами по обеим осям для изображения графика функции распределения случайной величины прямой линией.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные законы распределения случайных величин.
2. Назовите законы распределения случайных величин и соответствующие им наиболее характерные виды или причины отказов.
3. Расчет показателей надежности при экспоненциальном законе распределения.

4. Чему равна вероятность безотказной работы объекта на интервале равном средней наработке до отказа при экспоненциальном законе распределения?

5. Назовите последовательность действий при определении закона распределения случайной величины.

## **5. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

### **5.1. Общие сведения**

Как отмечалось в предыдущих разделах, тепловоз является сложной системой, состоящей из элементов, соединенных друг с другом в определенной последовательности.

Элементом называется часть системы, не имеющая самостоятельного эксплуатационного назначения и выполняющая в системе ограниченные функции. В свою очередь, системой называется совокупность совместно действующих устройств, обеспечивающих выполнение определенных практических задач.

В зависимости от постановки задач можно один и тот же объект рассматривать как элемент или как систему. Например, при оценке надежности тепловоза его рассматривают как систему, состоящую из основных элементов: дизеля, тягового генератора, выпрямителя, охлаждающих систем, тяговых электродвигателей, вспомогательных устройств и систем регулирования и управления. В том случае, когда возникает необходимость в определении показателей надежности, например, тягового электродвигателя или генератора, которые по отношению к конструкции тепловоза являются его элементами, их рассматривают уже как систему, состоящую из основных элементов: якоря, остова, щеточного аппарата, полюсов и т. д. При оценке надежности якоря тягового электродвигателя его рассматривают тоже как систему, состоящую из вала, якорной втулки, сердечника, коллектора, секций обмотки и т. п.

По характеру влияния отказов на выполнение определенной задачи в процессе применения по назначению системы подразделяют на простые и сложные. Простая система при отказе элементов либо полностью прекращает выполнение своих функций, либо продолжает выполнять свои функции в полном объеме, если отказавший элемент заменяется резервным. Сложные системы в результате наличия у них функциональной избыточности при отказе отдельных элементов и подсистем могут выполнять свои функции при некотором снижении характеристик эффективности. Отказ сложной системы определяется как событие, обусловленное выходом характеристик эффективности за нижний допустимый предел, и связанное с ним частичное или полное невыполнение задачи. Элементы в сложных системах могут иметь два типа соединения: резервное и основное.

## 5.2. Основное соединение элементов

Система, состоящая из нескольких независимых элементов, связанных функционально таким образом, что отказ любого из них вызывает отказ системы, отображается расчетной структурной схемой безотказной работы с последовательно соединенными событиями безотказной работы элементов [7]. На рис. 5.1 показана схема с последовательно соединенными элементами.

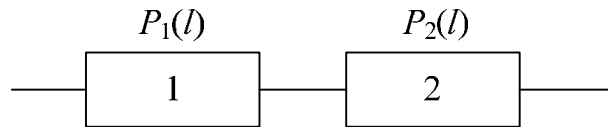


Рис. 5.1. Схема основного соединения элементов

Вероятность безотказной работы последовательной системы  $P_c(l)$  может быть представлена в виде:

$$P_c(l) = P_1(l) \cdot P_2(l). \quad (5.1)$$

Вероятность отказа

$$Q_c(l) = 1 - P_c(l) = 1 - P_1(l) \cdot P_2(l). \quad (5.2)$$

Интенсивность отказов и частота отказов

$$\lambda_c(l) = \lambda_1(l) + \lambda_2(l), \quad (5.3)$$

$$a_c(l) = (\lambda_1(l) + \lambda_2(l)) [P_1(l) \cdot P_2(l)]. \quad (5.4)$$

Так как вероятность безотказной работы каждого элемента, составляющего систему, всегда меньше единицы, то из анализа уравнения (5.1) следует, что чем больше в изделии последовательно соединенных элементов, тем ниже надежность системы. При этом надежность системы всегда меньше надежности самого ненадежного элемента.

Если принять, что время работы до отказа элементов системы подчиняется экспоненциальному закону распределения, то записанные выражения (5.1)–(5.4) преобразуются к виду:

$$P_c(l) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)l} = \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)l]; \quad (5.5)$$

$$Q_c(l) = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)l} = 1 - \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)l]; \quad (5.6)$$

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2; \quad (5.7)$$

$$a_c(l) = (\lambda_1 + \lambda_2) \exp[-(\lambda_1 + \lambda_2)l]. \quad (5.8)$$

Среднее время наработки до отказа (среднее время безотказной работы) системы

$$L_{1c} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{L_{11} \cdot L_{12}}{L_{11} + L_{12}}. \quad (5.9)$$

Выражения (5.5)–(5.9) можно обобщить для  $n$  простых, последовательно соединенных элементов:

$$P_c(l) = \exp \left[ - \sum_{i=1}^n \lambda_i l \right]; \quad (5.10)$$

$$Q_c(l) = 1 - \exp \left[ - \sum_{i=1}^n \lambda_i l \right]; \quad (5.11)$$

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad (5.12)$$

$$a_c(l) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \exp \left[ - \sum_{i=1}^n \lambda_i l \right]; \quad (5.13)$$

$$L_{1c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (5.14)$$

Из анализа вышеприведенных уравнений следует, что для того, чтобы обеспечить требуемую техническими условиями вероятность безотказной работы системы  $P_c(l)$  при увеличении числа последовательно соединенных элементов, необходимо снижать величину интенсивности отказов каждого элемента или принимать меры к повышению величины их средней наработки до отказа.

**Пример.** Нерезервированная система состоит из 5 элементов. Интенсивности их отказов приведены в табл. 5.1.

Требуется определить показатели надежности системы: интенсивность отказов, среднее время наработки до отказа, вероятность безотказной работы, частота отказов. Показатели надежности  $P(l)$  и  $a(l)$  получить в интервале от 0 до 1000 ч с шагом в 100 ч.

Таблица 5.1

#### Интенсивности отказов элементов

Номер элемента	1	2	3	4	5
$\lambda, \text{ час}^{-1}$	0,00007	0,00005	0,00004	0,00006	0,00004

Вычислим интенсивность отказа и среднюю наработку до отказа по уравнениям (5.12), (5.14):

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^5 \lambda_i = 0,00007 + 0,00005 + 0,00004 + \\ + 0,00006 + 0,00004 = 0,00026 \text{ ч}^{-1};$$

$$L_{1c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 \lambda_i} = \frac{1}{0,00026} = 3846 \text{ ч.}$$

Значения вероятности безотказной работы и частоты отказов получим, используя уравнения (5.10, 5.13) приведенные к виду:

$$P_c(l) = \exp \left[ - \sum_{i=1}^n \lambda_i l \right] = e^{-0,00026 \cdot l};$$

$$a_c(l) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \exp \left[ - \sum_{i=1}^n \lambda_i l \right] = 0,00026 \cdot e^{-0,00026 \cdot l}.$$

Результаты расчета  $P(l)$  и  $a(l)$  на интервале от 0 до 1000 ч работы представим в виде табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Результаты расчета вероятности безотказной работы  
и частоты отказов системы на интервале времени от 0 до 1000 ч**

$l$ , час	$P(l)$	$a(l)$ , час <sup>-1</sup>
0	1	0,00026
100	0,974335	0,000253
200	0,949329	0,000247
300	0,924964	0,00024
400	0,901225	0,000234
500	0,878095	0,000228
600	0,855559	0,000222
700	0,833601	0,000217
800	0,812207	0,000211
900	0,791362	0,000206
1000	0,771052	0,0002

Графическая иллюстрация  $P(l)$  и  $a(l)$  на участке до средней наработки до отказа представлена на рис. 5.2.

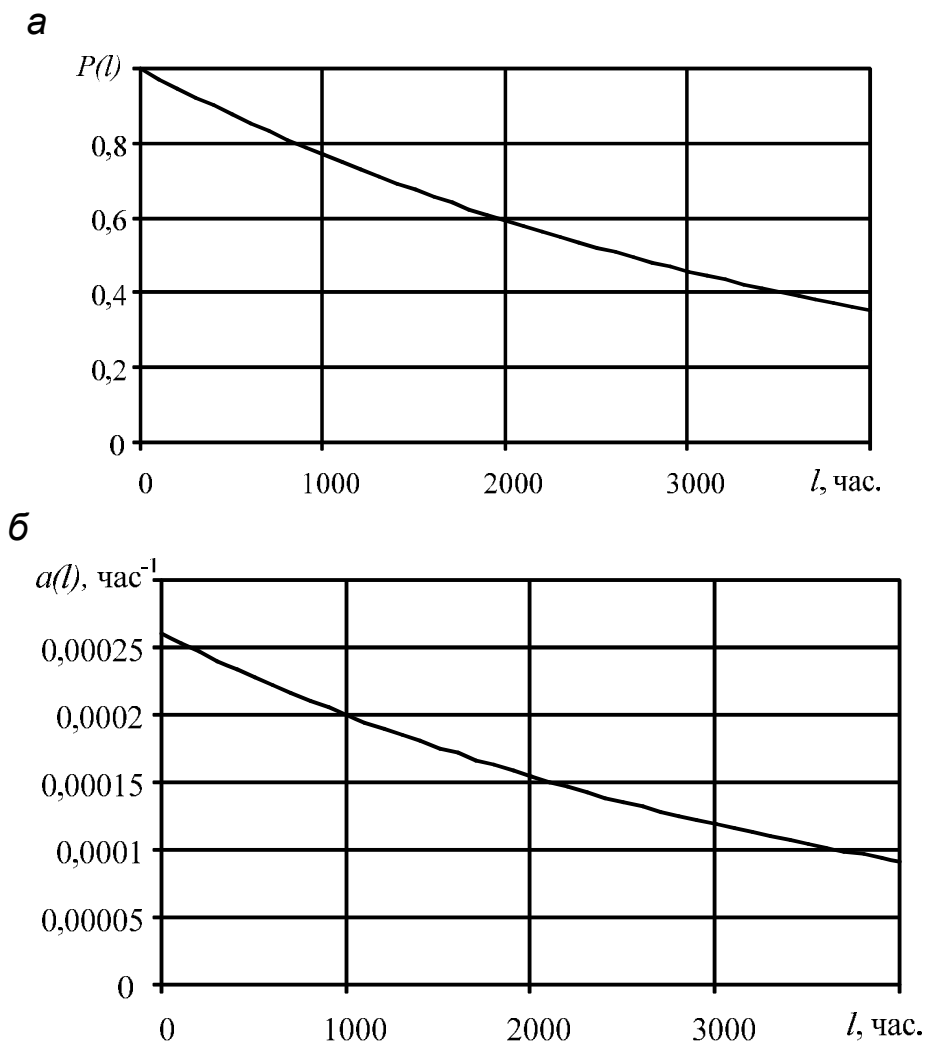


Рис. 5.2. Вероятность безотказной работы (а) и частота отказов (б) системы

### 5.3. Резервное соединение элементов

Эффективным средством повышения надежности сложных систем является использование в их конструкции резервных элементов. В этом случае выход из строя одного элемента не приводит к отказу всей системы. Система с резервом может выполнять свои функции при наличии повреждения, но с меньшей надежностью [3].

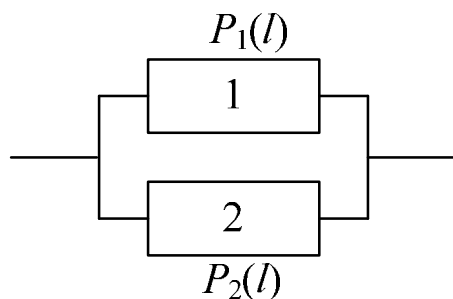


Рис. 5.3. Схема системы с параллельно функционирующими элементами

На рис. 5.3 изображена система с параллельным соединением элементов, состоящая из независимых элементов, связанных функционально так, что отказ системы происходит из-за отказа всех элементов. При этом предполагается, что элементы выполняют одновременно одну и ту же функцию: отказы одного или нескольких элементов не

изменяют режим работы и, следовательно, показатели надежности элементов, оставшихся работоспособными.

Вероятность безотказной работы системы с параллельно соединенными элементами  $P_c(l)$  находится из уравнения

$$P_c(l) = 1 - [1 - P_1(l)][1 - P_2(l)]. \quad (5.15)$$

Вероятность отказа

$$Q_c(l) = (1 - P_1(l))(1 - P_2(l)) = Q_1(l) Q_2(l). \quad (5.16)$$

В общем случае, когда система или ее участок состоит из  $n$  параллельно соединенных элементов, выражения (5.15) и (5.16) можно записать в виде

$$P_c(l) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(l)], \quad (5.17)$$

$$Q_c(l) = \prod_{i=1}^n Q_i(l) = \prod_{i=1}^n [1 - P_i(l)]. \quad (5.18)$$

Если элементы в системе одинаковы, т. е.  $P_1(l) = P_2(l) = \dots = P_i(l)$ , то

$$P_c(l) = 1 - [1 - P(l)]^n; \quad (5.19)$$

$$Q_c(l) = Q(l)^n = (1 - P(l))^n. \quad (5.20)$$

Надежность системы с параллельным соединением элементов будет всегда выше надежности самого качественного (надежного) элемента. Поэтому резервирование элементов в системе это не что иное как метод создания надежных систем из недостаточно надежных элементов.

**Пример.** Определим вероятность безотказной работы блока, состоящего из трех параллельно соединенных элементов с вероятностью их безотказной работы:  $P_1(l) = 0,95$ ;  $P_2(l) = 0,9$ ;  $P_3(l) = 0,8$ .

С помощью выражения (5.17) получим

$$P_c(l) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(l)] = 1 - (1 - 0,95)(1 - 0,9)(1 - 0,8) = 1 - 0,001 = 0,999.$$

Необходимо отметить, что немало важную роль в повышении надежности системы резервированием играет схема резервирования.

Для наглядности рассмотрим **пример**. На рис. 5.4 показаны две структурные схемы соединения элементов: общего (рис. 5.4, а) и поэлементного резервирования (рис. 5.4, б).

Принимая  $P_1(l) = P'_1(l) = 0,95$ ;  $P_2(l) = P'_2(l) = 0,9$ ;  $P_3(l) = P'_3(l) = 0,85$ , рассчитаем надежность двух систем.

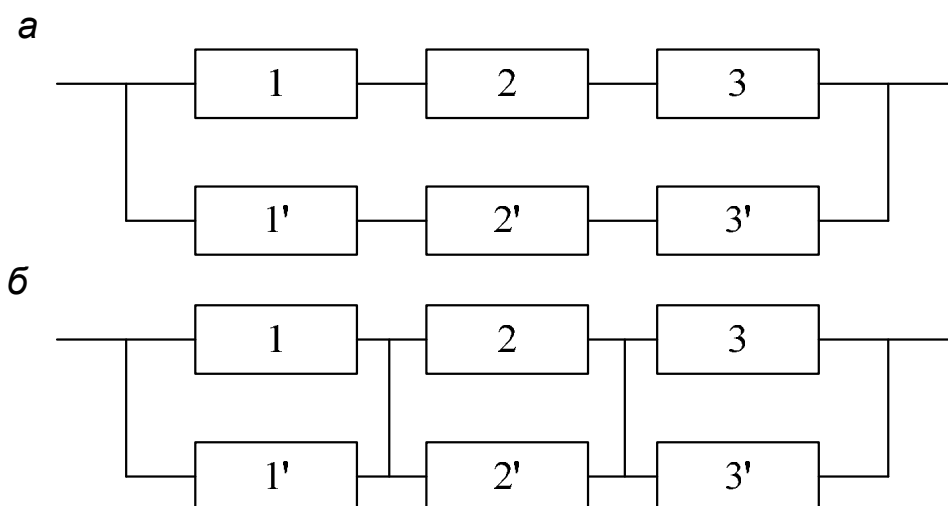


Рис. 5.4. Схема системы с параллельно функционирующими элементами

Вероятность безотказной работы блока из трех элементов без резервирования рассчитаем по выражению (5.1)

$$P_c(l) = \prod_{i=1}^3 P_i(l) = 0,95 \cdot 0,9 \cdot 0,85 = 0,726.$$

Вероятность безотказной работы той же системы при общем резервировании (рис. 5.3, а) в соответствии с (5.17) составит

$$P_c(l) = 1 - \prod_{i=1}^2 [1 - P_i(l)] = 1 - (1 - 0,726)(1 - 0,726) = 0,925.$$

Вероятности безотказной работы каждого из трех блоков при поэтапном резервировании (рис. 5.3, б) будут иметь вид:

$$P_1(l) = 1 - \prod_{i=1}^2 [1 - P_i(l)] = 1 - (1 - 0,95)(1 - 0,95) = 0,9975;$$

$$P_2(l) = 1 - \prod_{i=1}^2 [1 - P_i(l)] = 1 - (1 - 0,9)(1 - 0,9) = 0,99;$$

$$P_3(l) = 1 - \prod_{i=1}^2 [1 - P_i(l)] = 1 - (1 - 0,85)(1 - 0,85) = 0,9775.$$

Вероятность безотказной работы системы при поэтапном резервировании составит:

$$P_c(l) = \prod_{i=1}^3 P_i(l) = 0,9975 \cdot 0,99 \cdot 0,9775 = 0,965.$$

Таким образом, поэтапное резервирование дает более существенное увеличение надежности (вероятность безотказной работы возросла с 0,925 до 0,965, т. е. на 4 %).



На практике чаще всего большинство элементов, составляющих систему, в смысле надежности включены последовательно, но часть наиболее ответственных элементов при недостаточном уровне их надежности может быть прорезервирована. При расчете безотказности такого рода систем с комбинированным включением элементов, поступают следующим образом (рис. 5.5).

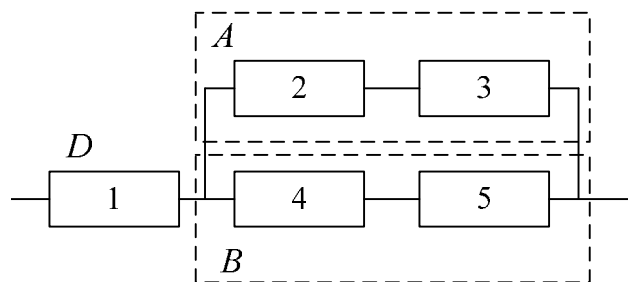


Рис. 5.5. Схема системы при комбинированном функционировании элементов

Рассчитываем отдельно надежность подсистем  $A$  и  $B$ :

$$P_A(l) = P_2(l) \cdot P_3(l); \quad P_B(l) = P_4(l) \cdot P_5(l).$$

Далее рассчитываем безотказность объединенной подсистемы, включающей подсистемы  $A$  и  $B$ :

$$P_{AB}(l) = 1 - [1 - P_A(l)][1 - P_B(l)].$$

Окончательный результат – надежность всей системы определяем

$$P_D(l) = P_1(l) \cdot P_{AB}(l).$$

**Пример.** Требуется определить надежность системы с комбинированным соединением элементов, представленную на рис. 5.6. При этом вероятности безотказной работы элементов имеют следующие значения:  $P_1 = 0,8$ ;  $P_2 = 0,9$ ;  $P_3 = 0,95$ ;  $P_4 = 0,97$ . Также необходимо определить надежность этой же системы при условии, что резервные элементы отсутствуют.

Для расчета в исходной системе необходимо выделить основные блоки. В представленной системе их три (рис. 5.7).

Далее рассчитаем надежность каждого блока в отдельности, а затем найдем надежность всей системы:

$$P_I = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - P_i] = 1 - [1 - P_1][1 - P_1] = 1 - [1 - 0,8][1 - 0,8] = 0,96.$$

$$P_{II} = 1 - [1 - P_2 \cdot P_3][1 - P_2 \cdot P_3] = 1 - [1 - 0,9 \cdot 0,95][1 - 0,9 \cdot 0,95] = 0,98.$$

$$P_c = \prod_{i=1}^N P_i = P_I \cdot P_{II} \cdot P_{III} = 0,96 \cdot 0,98 \cdot 0,97 = 0,91.$$

Надежность системы без резервирования составит:

$$P_c = \prod_{i=1}^N P_i = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,97 = 0,663.$$

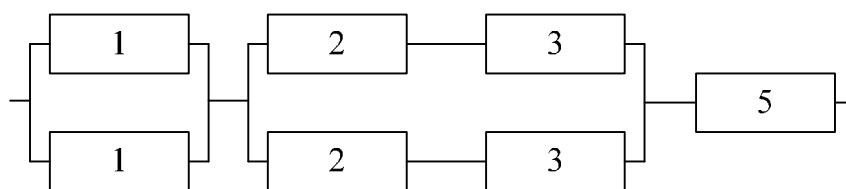


Рис. 5.6. Схема системы при комбинированном функционировании элементов

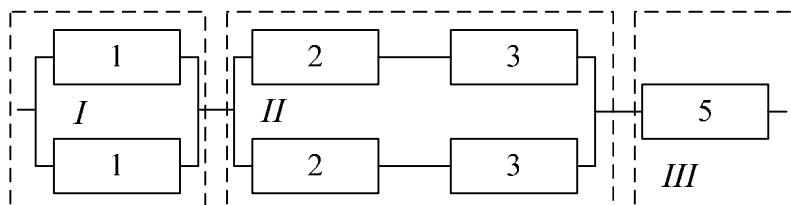


Рис. 5.7. Сблокированная схема

Таким образом, система без резервирования является на 28 % менее надежной, чем система с резервированием.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите существующие виды соединений элементов и приведите примеры.
2. Расчет показателей надежности при основном соединении элементов.
3. Расчет показателей надежности при резервном соединении элементов.
4. Порядок расчета системы включающей как основное так и резервное соединение элементов.

## 6. ИНФОРМАЦИЯ О НАДЕЖНОСТИ. МЕТОДЫ СБОРА И АНАЛИЗА

### 6.1. Требования, предъявляемые к информации о надежности

Анализ количественных показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости позволяет разрабатывать последующие мероприятия по повышению уровня надежности локомотивов, элементов их конструкции и их сборочных единиц. Точность, объективность и достоверность этих показателей полностью зависят от объема, достоверности и объективности исходной статистической информации, получаемой в конкретных условиях эксплуатации [7, 11]. Сбор и обработка информации о надежности локомотивов должны обеспечивать решение следующих задач:

- определение и анализ количественных показателей надежности локомотивов и их сборочных единиц;
- выявление конструктивных и технологических недостатков узлов, агрегатов, деталей, снижающих и ограничивающих надежность локомотивов;
- выявление закономерностей возникновения отказов и влияния условий эксплуатации и режимов работы на уровень надежности;
- корректировка нормируемых показателей надежности;
- выявление недостатков эксплуатации локомотивов, совершенствование системы их технического обслуживания и ремонта, оптимизация норм расхода запасных частей и материалов для ремонта отказавших узлов и деталей;
- разработка конструктивных и технологических мер для повышения надежности узлов и деталей.

В связи с этим к исходной статистической информации предъявляются соответствующие требования [10].

Информация должна быть *достоверной*. Так как появление отказа является случайным, то внесение субъективных погрешностей, связанных с недостаточной квалификацией или недобросовестностью работников, не позволит выявить какие-либо закономерности в появлении того или иного отказа, или обработка такой информации может привести к неправильным выводам о фактической надежности локомотива или его сборочных единиц. Для обоснования выводов и решений необходимо, чтобы информация была *полной*. При анализе надежности локомотивов информация собирается как по отказам в межремонтный период (неплановый ремонт), так и по отказам, обнаруженным на плановых ремонтах и вызвавшим увеличение объема работ или простоя (наличие сверхпланового ремонта). Информация должна быть *оперативной*. В условиях интенсивных перевозок особое значение обретает оперативность обеспечения необходимой информацией об отказах с их качественными и количественными характеристиками. В локомотиве работа всех сборочных единиц является взаимосвязанной. Поэтому несвоевременное обнаружение отказа даже какой-либо малозначительной детали может привести к тяжелым последствиям и повлечь отказ всего локомотива. Особенно остро стоит вопрос оперативной информации о деталях и сборочных единицах, непосредственно обеспечивающих безопасность движения поездов [3].

Информация должна легко обрабатываться, быть *краткой* и *информативно емкой*. Для этого необходима современная система кодирования, передачи и обработки информации для последующей автоматизации, учета и отчетности. В кратких формах учета данных об отказах отражаются четкие и достаточные сведения для выявления причин и последствий отказов, в частности, паспортные данные локомотива; депо и дороги приписки; режимы эксплуатации; даты всех плановых и неплановых ремонтов и обслуживаний; ха-

рактр повреждения (отказа) и возможные причины; наработки до отказа от постройки и от всех видов ремонта и технического обслуживания.

## 6.2. Порядок сбора информации о надежности

Порядок сбора информации о надежности объектов, формы учета и накопления данных о неисправностях и отказах определены в ГОСТ 27.502-83 и ОСТ 32.70-96 «Тепловозы. Система сбора и обработки информации о надежности с мест эксплуатации».

В соответствии с этими документами предусмотрены определенные формы первичных данных: учет эксплуатационной информации о надежности; сбор информации об отказах; запись результатов анализа надежности. В табл. 6.1 [10] приведен перечень форм первичного учета, используемых при сборе информации о надежности и использовании тепловозов.

Таблица 6.1

### Перечень форм первичного учета

№ п/п	Обозначение	Расшифровка
<b>Формы учета, содержащие информацию о надежности как тепловоза в целом, так и его оборудования</b>		
1	ТУ-7	Донесение об отказе изделия
2	ТУ-10а	Лицевой счет локомотива (тепловоза, электровоза)
3	ТУ-17	Книга учета состояния бандажей колесных пар и пробегов локомотивов, вагонов электропоездов, дизельпоездов
4	ТУ-18	Карманная книжка обмера бандажей локомотивов
5	ТЭУ-21	Технический акт о повреждении и неисправности локомотива
6	ТУТ-23	Предварительная опись состояния тепловоза (дизельпоезда), направляемого в ремонт
7	ТУ-27	Книга регистрации ремонтов, профилактических осмотров и учета пробегов локомотивов, секций дизель- и электропоездов между всеми видами ремонтов
8	ТУ-24	Карточка учета часов простоя локомотива в депо приписки
9	ТУ-28	Книга записи ремонта локомотивов
10	ТУ-29	Книга повреждений и неисправностей локомотивов и моторвагонного подвижного состава и их оборудования
11	ТУ-29ВД	Книга повреждений и неисправностей локомотивов и моторвагонного подвижного состава
12	ТУ-137	Книга замечаний машинистов
13	ТУ-150	Книга учета технического обслуживания локомотивов и моторвагонного подвижного состава
14	ТУ-151	Журнал цеха
15	ТУ-152	Журнал технического состояния локомотива (бортовой журнал)

№ п/п	Обозна- чение	Расшифровка
<b>Формы учета, содержащие информацию о надежности отдельных сборочных единиц тепловозов</b>		
16	ТУ-92	Журнал осмотра и ремонта подшипников качения
17	ТУ-132	Журнал регистрации основных деталей локомотивов, забракованных по трещинам и другим дефектам, обнаруженным дефектоскопом
18	ТУ-142	Журнал результатов лабораторного анализа воды из охлаждающей системы двигателей тепловозов
19	ТУ-143	Журнал результатов испытаний электрических машин на испытательной станции (стенде)
20	ТУ-144	Журнал результатов испытания электроаппаратов на испытательной станции (стенде)
21	ТУ-145	Журнал результатов лабораторного анализа дизельного масла тепловозов и дизельпоездов
22	ТУ-148	Результаты реостатных испытаний тепловозов
23	ТУ-155	Журнал записи результатов лабораторного анализа нефтепродуктов
24	ТУ-14	Книга учета, осмотра, ремонта и испытания тормозного оборудования локомотивов и моторвагонного подвижного состава
25	ТУ-21	Книга регистрации освидетельствования колесных пар локомотивов
<b>Перечень паспортов (формуляров) тепловоза и его основного оборудования</b>		
26	ТУ-9т	Технический паспорт тепловоза
27	ТЭУ-38а	Технический паспорт тягового двигателя
28	ТЭУ-38б	Технический паспорт вспомогательной машины
29	ТУ-19	Технический паспорт колесной пары
30	ТЭУ-37	Учетная карточка аккумуляторной батареи
31	ТЭУ-5	Технический паспорт тормозного компрессора

Для каждой серии локомотива разрабатывается специальный алгоритм фиксации неисправности. Фрагмент такого алгоритма приведен на рис.6.1, где заштрихованные позиции указывают путь прохождения алгоритма классификации отказа 6-го цилиндра дизеля из-за износа [7].

Сформированный код принимает вид 1.1.1.6.1.3, в котором заключена информация: отказ произошел в системе дизель (1), отказавшим узлом является цилиндро-поршневая группа (1), отказавшая деталь – цилиндр (1), по счету шестой цилиндр (6), вид неисправности – износ (1), произведена замена новым поршнем (3), что исключает необходимость работы с текстовой информацией при передаче данных для дальнейшего анализа при помощи ЭВМ.

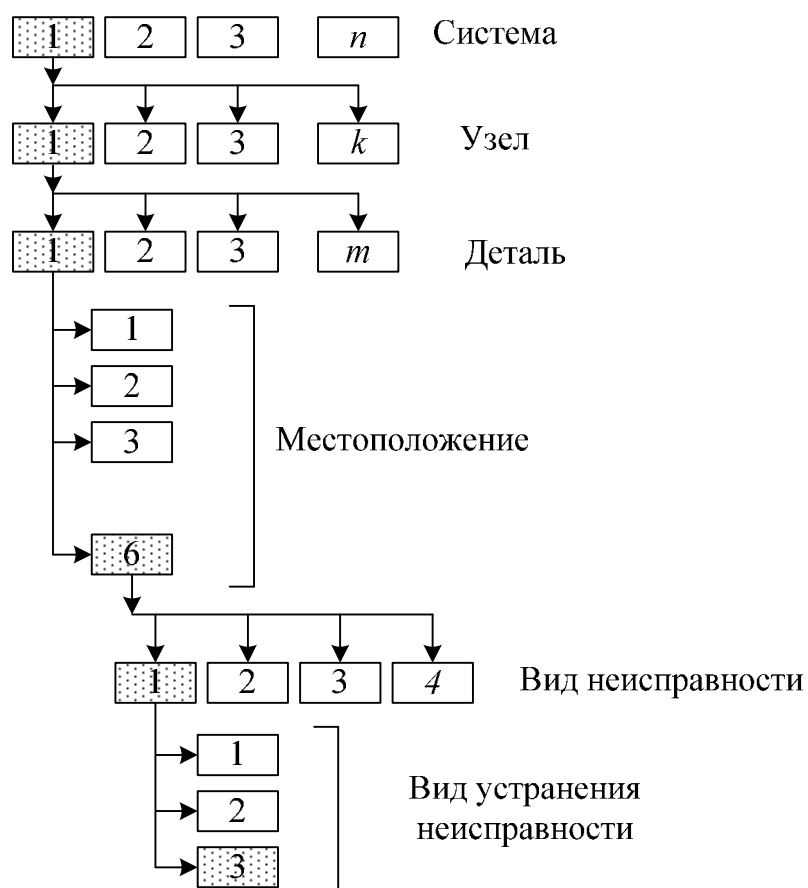


Рис. 6.1. Фрагмент алгоритма фиксации отказа

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Решение каких задач обеспечивает информация о надежности?
2. Перечислите основные требования, предъявляемые к информации о надежности.
3. Укажите основные формы первичного учета информации об отказах, используемые в эксплуатации локомотивов.
4. Укажите основные формы первичного учета информации об отказах, используемые в процессе ремонта локомотивов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Повышение надежности локомотивов, их сборочных единиц, узлов и деталей является одним из самых приоритетных направлений, которые стоят перед локомотивостроительными заводами, а также перед эксплуатационными и ремонтными предприятиями. Поэтому все более возрастает необходимость научного подхода к вопросам надежности отдельных элементов и систем в целом на этапах проектирования и изготовления. Понесенные расходы полностью оправдают себя за счет снижения эксплуатационных и ремонтных затрат в процессе жизненного цикла локомотива.

Современный уровень развития науки и техники требует создания деталей, узлов и сборочных единиц локомотива, позволяющих как можно большее время работать на участке нормальной работы (по классическому распределению интенсивности отказов) до полного выхода их из строя, не отражаясь при этом на безопасности движения, с последующей заменой новыми. Данный подход позволит во многом сократить затраты на ремонт и техническое обслуживание, так как (по статистическим данным) при существующем уровне надежности систем локомотива и соответствующей ей планово-предупредительной системе ремонта, ремонт каждого локомотива за весь срок его службы обходится более, чем в 10 раз дороже его первоначальной стоимости.

Также необходимо отметить и более широкую возможность внедрения на железнодорожном транспорте систем резервирования, позволяющих резко повысить надежность локомотива в целом, что в конечном счете положительно повлияет на повышение уровня безопасности движения на железнодорожном транспорте.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1990-07-01.
2. ОСТ 32.46-95. Тяговый подвижной состав железнодорожного транспорта. Надежность. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1996-01-01.
3. Галкин, В.Г. Надежность тягового подвижного состава [Текст]: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов. – М. : Транспорт, 1981. – 184 с.
4. Типовая методика приемочных эксплуатационно-ремонтных испытаний тепловозов.
5. Шишков, А.Д. Народнохозяйственная эффективность повышения надежности технических средств железнодорожного транспорта [Текст] / А.Д. Шишков. – М. : Транспорт, 1986. – 183 с.
6. Моисеев, Г.А. Секционная мощность тепловозов и проблемы надежности [Текст] / Г.А. Моисеев. – М. : Транспорт, 1978. – 112 с.
7. Четвергов, В.А. Надежность локомотивов [Текст] : учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В.А. Четвергов, А.Д. Пузанков. – М. : Маршрут, 2003. – 415 с.
8. Вознюк, В.Н. Надежность тепловозов [Текст] / В.Н. Вознюк [и др.]. – М. : Транспорт, 1991. – 159 с.
9. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность [Текст]. – Введ. 1987-12-24.
10. ОСТ 32.70-96. Тепловозы. Система сбора и обработки информации о надежности с мест эксплуатации [Текст]. – Взамен РТМ 24.040.05-79; введ. 1997-07-01.
11. Бородин, А.П. Надежность и диагностика локомотивов [Текст] : учеб. пос. / А.П. Бородин. – М. : РГОТУПС, 2002. – 65 с.
12. ГОСТ Р 27.001-2009. Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения [Текст]. – Введ. 2010-09-01.
13. Половко, А.М. Основы теории надежности. Практикум [Текст] / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
14. Половко, А.М. Основы теории надежности. Практикум [Текст] / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 470 с.
15. Справочник по надежности [Текст] : пер. с англ. / пер. Ю.Г. Епишина, Б.А. Смиренина; под. ред. Б.Р. Левина. – М. : Мир, 1969. – 339 с.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ЗАДАЧИ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>4</b>
1.1. Задачи в области надежности тепловозов .....	4
1.2. Основные термины и определения дисциплины.....	4
1.3. Повреждения, отказы и их классификация .....	10
1.4. Система управления надежностью тепловозов .....	14
<b>2. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ .....</b>	<b>17</b>
2.1. Общие сведения.....	17
2.2. Показатели безотказности .....	19
2.2.1. Вероятность безотказной работы.....	19
2.2.2. Вероятность отказа .....	20
2.2.3. Частота отказов .....	20
2.2.4. Интенсивность отказов .....	21
2.2.5. Средняя наработка до отказа.....	22
2.2.6. Параметр потока отказов.....	23
2.2.7. Среднее значение параметра потока отказов.....	23
2.2.8. Средняя наработка на отказ.....	23
2.3. Показатели долговечности .....	24
2.3.1. Пробеги между техническими обслуживаниями и ремонтами .....	24
2.3.2. Назначенный ресурс.....	24
2.3.3. Гарантийный срок службы.....	24
2.3.4. Гамма-процентная наработка .....	24
2.3.5. Срок службы до списания.....	25
2.4. Показатели ремонтпригодности .....	25
2.4.1. Среднее время восстановления .....	25
2.4.2. Средняя трудоемкость восстановления.....	25
2.4.3. Средний простой в ремонте .....	26
2.4.4. Средняя стоимость ремонта .....	26
2.5. Показатели сохраняемости.....	26
2.5.1. Срок сохраняемости .....	26
2.5.2. Среднее время исправного состояния при хранении .....	26
2.6. Комплексные показатели .....	27
2.6.1. Коэффициент готовности .....	27
2.6.2. Коэффициент оперативной готовности .....	28
2.6.3. Коэффициент простоя .....	28
2.6.4. Коэффициент технического использования локомотивов.....	28
2.6.5. Коэффициент затрат на техническое обслуживание и ремонт .....	28
2.6.6. Ремонтоемкость .....	29
2.7. Пример расчета показателей безотказности.....	29

<b>3. ПЛАНЫ НАБЛЮДЕНИЙ .....</b>	<b>34</b>
3.1. Общие сведения .....	34
3.2. План наблюдений $[N, U, M]$ .....	35
3.3. План наблюдений $[N, U, L_0]$ .....	36
3.4. План наблюдений $[N, U, r]$ и $[N, R, r]$ .....	37
3.5. План наблюдений $[N, R, L_0]$ .....	37
3.6. Определение минимального объема наблюдений .....	39
<b>4. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН .....</b>	<b>40</b>
4.1. Общие сведения .....	40
4.2. Экспоненциальный закон распределения .....	41
4.3. Нормальный закон распределения .....	43
4.4. Закон распределения Вейбулла–Гнеденко .....	44
4.5. Закон распределения Рэлея .....	46
4.6. Определение закона распределения .....	47
<b>5. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>50</b>
5.1. Общие сведения .....	50
5.2. Основное соединение элементов .....	51
5.3. Резервное соединение элементов .....	54
<b>6. ИНФОРМАЦИЯ О НАДЕЖНОСТИ. МЕТОДЫ СБОРА И АНАЛИЗА .....</b>	<b>58</b>
6.1. Требования, предъявляемые к информации о надежности .....	58
6.2. Порядок сбора информации о надежности .....	60
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>63</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>64</b>

Учебное издание

**Кочерга Владимир Геннадьевич**

## **НАДЕЖНОСТЬ ТЕПЛОВОЗОВ**

Учебное пособие

Редактор *А.А. Иванова*  
Технический редактор *Н.В. Ларионова*

---

План 2012 г. Поз. 1.8. Подписано в печать 02.02.2012.  
Гарнитура Arial. Печать RISO.  
Усл. печ. л. 3,8. Уч.-изд. л. 4,3.  
Зак. 48. Тираж 50 экз. Цена 196 р.

---

Издательство ДВГУПС  
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.