

Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

В. Ю. ШИШМАРЁВ

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Учебник

*Для студентов учреждений
высшего профессионального образования,
обучающихся по направлению подготовки 220700
«Автоматизация технологических процессов и производств»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 681.5(075.8)
ББК 32.965я73
Ш657

Рецензенты:

проф. кафедры «Технология машиностроения» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», д-р техн. наук, проф.

В. А. Тимирязев;

зам. главного конструктора Московского института электромеханики и автоматики, д-р техн. наук *Е. А. Измайлов*

Шишмарёв В. Ю.

Ш657 Диагностика и надежность автоматизированных систем : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 352 с. — (Сер. Бакалавриат).

ISBN 978-5-7695-6919-7

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств» (квалификация «бакалавр»).

Рассмотрены показатели надежности ремонтируемых и неремонтируемых объектов; методы оценки надежности нерезервированных и резервированных систем; принципы конструирования, обеспечивающие получение надежных систем. Изложены методы расчета надежности систем, особенности оценки надежности автоматизированных систем типа «человек — техника», специфика оценки надежности систем по результатам испытаний. Приведены расчеты надежности элементов технических систем, надежности машин и систем. Даны основные понятия и задачи технической диагностики. Описаны методы построения диагностических систем для оценки технического состояния типового технологического оборудования: металлорежущих станков с ЧПУ, промышленных роботов, агрегатных станков и автоматических линий.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 681.5(075.8)
ББК 32.965я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Шишмарёв В. Ю., 2013

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013

ISBN 978-5-7695-6919-7

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

В связи с развитием технического прогресса все более актуальными становятся вопросы повышения надежности разнообразных технических устройств и систем — механизмов, машин, станков, аппаратов, приборов, систем автоматики, электронного оборудования и т. д. Надежность является важнейшим технико-экономическим показателем качества любого технического устройства или системы. В связи с этим при широком применении машин и исполнительных механизмов в системах автоматического управления производственными процессами технический уровень производства в большей степени определяется надежностью этих машин и систем. Отказы машин и систем в процессе эксплуатации наносят значительный материальный ущерб народному хозяйству.

Современные машины используются в разнообразных климатических условиях. К этим условиям относятся: изменение температуры и давления окружающего воздуха, высокая влажность, различные агрессивные среды, удары и вибрации, высокие механические перегрузки и т. д. Все эти факторы оказывают неблагоприятное влияние на надежность машин и систем. К машинам, работающим в указанных условиях, можно отнести, например, системы летательных аппаратов, используемых в условиях широкого диапазона изменения температуры и давления окружающего воздуха.

Под *надежностью машины или системы* понимается ее способность безотказно работать с неизменными техническими характеристиками в течение заданного промежутка времени и при определенных условиях применения. Следовательно, надежность машинной системы характеризуется вероятностью безотказной работы в течение заданного промежутка времени.

Под отказом в теории надежности понимается событие, после возникновения которого изделие утрачивает свою способность выполнять заданные функции. В общем случае под отказом следует понимать не только непредвиденную остановку системы из-за случайной ее неисправности, но также и вынужденное прекращение ее работы для выполнения необходимого ремонта и наладки. Поэтому к отказу в работе нужно относить и все выходы из рабочего состояния.

Первоначально вопросы надежности исследовались в области механического оборудования. Для обеспечения надежности работы этого оборудования при его проектировании и изготовлении закладывался определенный запас прочности в отдельные детали и этим создавалась необходимая гарантия надежности работы и долговечности службы.

С развитием электрификации возникли проблемы обеспечения надежной передачи электроэнергии. Такие меры, как использование параллельной работы электрических машин и трансформаторов, наличие на электростанциях резерва, объединение высоковольтных линий электропередачи в единую систему и другие мероприятия направлены на то, чтобы снабжение электроэнергией потребителей было возможно более надежным.

Новое направление проблема надежности получила с появлением и развитием радиоэлектроники, авиации, ракетной и космической техники. Сначала проблема надежности в этих отраслях решалась путем использования высоких запасов прочности и широкого применения резервирования, что приводило к значительному увеличению массы оборудования. Однако такой путь повышения надежности для новых типов авиационного оборудования и радиоэлектронной аппаратуры оказался неприемлемым. Современная техника требует существенного уменьшения массы и габаритных размеров оборудования при высокой его надежности.

Надежность сложного оборудования зависит от надежности работы его элементов. Например, надежность электрической машины, как сложного устройства, зависит от надежности работы ее основных частей: магнитной системы, обмоток статора и ротора, подшипников, коллектора или контактных колец и щеточного устройства. Теория надежности различает три характерных типа отказов, которые внутренне присущи машине или любому изделию и проявляются независимо от обслуживающего персонала:

1) отказы, которые происходят в течение раннего периода эксплуатации. Они называются приработочными отказами и в большинстве случаев происходят вследствие недостатков технологии производства и недостаточного качества контроля деталей при их изготовлении и сборке;

2) отказы, вызываемые износом отдельных частей машины и систем. Они возникают в машинах и системах, которые длительно работают без ремонта или же неправильно обслуживаются. Отказы за счет износа деталей являются признаком старения системы. Во многих случаях отказы в работе системы за счет износа ее деталей могут быть ограничены путем своевременной замены их новыми во время ремонта;

3) внезапные отказы в период нормальной эксплуатации системы, которые возникают случайно и не могут быть устранены ни наладкой, ни наилучшим ее обслуживанием. Под внезапным отказом понимается отказ, возникший в результате скачкообразного изменения характеристик или параметров машины или системы под влиянием внезапных перегрузок или других факторов.

Теория надежности машин и систем развивается относительно недавно и поэтому не может еще претендовать на законченность. Некоторые вопросы этой теории еще недостаточно разработаны и нуждаются в уточнении. Имеющиеся опубликованные неполные статистические данные об уровне надежности различных типов эксплуатируемых машин и систем в настоящее время в связи с интенсивным развитием новых методов проектирования и производства уже недостаточно полно отражают фактическое состояние проблемы надежности, в особенности на фоне совершенствования конструкций, появления новых материалов для них и т.д. Теория надежности машин и систем охватывает широкий круг вопросов, отражающих общую теорию надежности, вопросы проектирования, технологии производства и эксплуатации этих систем. В связи с этим ознакомление с этой проблемой требует знаний в области конкретных изделий и математической подготовки.

Техническая диагностика — это научно-техническая дисциплина, изучающая и устанавливающая признаки дефектов технических объектов, а также методы и средства обнаружения и поиска (указания местоположения) дефектов. Основным предметом технической диагностики — организация эффективной проверки исправности, работоспособности, правильности функционирования технических объектов (деталей, элементов, узлов, блоков, заготовок, устройств, изделий, агрегатов, систем, а также процессов передачи, обработки и хранения материи, энергии и информации), т.е. организация процессов диагностирования технического состояния объектов при их изготовлении и эксплуатации, в том числе во время, до и после применения по назначению, при профилактике, ремонте и хранении. Диагностирование — одна из важных мер обеспечения и поддержания надежности технических объектов.

Диагностирование осуществляется человеком непосредственно (например, внешним осмотром, «на слух») или с помощью аппаратуры. Объект и средства диагностирования в совокупности образуют систему диагностирования. Взаимодействуя между собой, объект и средства реализуют некоторый алгоритм диагностирования. Результатом является заключение о техническом состоянии объекта — технический диагноз, например «радиоприемник исправен», «станок неработоспособен», «в телевизоре отказал частотный детектор».

Различают системы тестового и функционального диагностирования. Системы тестового диагностирования применяют при изготовлении объекта, во время его ремонта и профилактики и при хранении, а также перед применением и после него, когда необходимы проверка исправности объекта или его работоспособности и поиск дефектов. В этом случае на объект диагностирования подаются специально организуемые тестовые воздействия.

Системы функционального диагностирования применяют при использовании объекта по назначению, когда необходимы проверка правильности функционирования и поиск дефектов, нарушающих последнее. При этом на объект поступают только предусмотренные его алгоритмом функционирования (рабочие) воздействия.

Разработка и создание систем диагностирования включают в себя: изучение объекта, его возможных дефектов и их признаков; составление математических моделей (формализованного описания) исправного или работоспособного объекта и того же объекта в неисправных состояниях; построение алгоритмов диагностирования; отладку и опробование системы.

В изучении объектов большое значение имеет их классификация различным признакам: по характеру изменения значений параметров, виду потребляемой энергии и т. п. Изучение дефектов проводится в целях определения их природы, причин и вероятностей возникновения, физических условий их проявления, условий обнаружения и т. п.

Математическая модель объекта диагностирования (детерминированная или вероятностная) — это описание объекта в исправном и в неисправном его состояниях в виде формальных зависимостей между возможными воздействиями на объект и его реакциями на эти воздействия.

Модели даже исправных объектов, используемые при диагностировании, могут отличаться от моделей, используемых при проектировании тех же объектов. Например, для диагностирования технического состояния шумящих объектов моделями могут служить кривые шума или вибрации при акустических методах испытаний, а в микроэлектронной технологии или в сварочном производстве — изображения объектов в рентгеновских лучах при неразрушающем контроле.

Алгоритм диагностирования предусматривает выполнение некоторой последовательности определенных экспериментов с объектом. Эксперимент характеризуется тестовым или рабочим воздействием и составом контролируемых признаков, определяющих реакцию объекта на воздействие.

Различают алгоритмы проверки и алгоритмы поиска неисправности. Алгоритмы проверки позволяют обнаружить наличие де-

фектов, нарушающих исправность объекта, его работоспособность или правильность функционирования. По результатам экспериментов, проведенных в соответствии с алгоритмом поиска неисправностей, можно указать, какой дефект или группа дефектов (из числа рассматриваемых) имеются в объекте.

Средства диагностирования являются носителями алгоритмов диагностирования, хранят возможные реакции объекта на воздействия, вырабатывают и подают на объект тестовые воздействия, «читают» фактические реакции объекта и ставят диагноз, сравнивая фактические реакции с возможными. Они подразделяются на аппаратные, программные и программно-аппаратные (средства двух последних категорий применяются для диагностирования технического состояния ЭВМ, работающих по сменной программе). Аппаратные средства бывают внешние (по отношению к объекту) и встроенные. Первые применяются в основном в системах тестового, вторые — функционального диагностирования. Внешние аппаратные средства могут быть автоматическими, автоматизированными или с ручным управлением, универсальными или специализированными.

Методологически техническая диагностика имеет много общего с медицинской диагностикой. Техническая диагностика, которая определяет техническое состояние объектов в настоящий момент времени, тесно связана с технической прогностикой и технической генетикой, определяющими будущие и прошлые технические состояния соответственно через вероятные эволюции и предыстории настоящего технического состояния.

1.1. Основные термины и определения

Надежность (общая) — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях эксплуатации.

Первостепенное значение надежности в технике связано с тем, что уровень надежности в значительной степени определяет развитие техники по основным направлениям: автоматизации производства, интенсификации рабочих процессов и транспорта, экономии материалов и энергии.

Современные технические средства состоят из множества взаимодействующих механизмов, аппаратов и приборов. Например, в современных автоматизированных прокатных комплексах насчитывается более миллиона деталей, современные системы радиуправления ракетами имеют десятки миллионов элементов, тогда как первые простейшие машины и радиоприемники состояли только из десятков или сотен деталей. Отказ в работе хотя бы одного ответственного элемента сложной системы без резервирования может привести к нарушению работы всей системы.

Недостаточная надежность оборудования приводит к огромным затратам на ремонт, простоям оборудования, прекращению снабжения населения электроэнергией, водой, газом, транспортными средствами, иногда к авариям, связанным с большими экономическими потерями, разрушением крупных объектов и человеческими жертвами.

При недостаточной долговечности машины изготавливают в большем, чем нужно, количестве, что ведет к перерасходу металла, излишкам производственных мощностей, завышению расходов на ремонт и эксплуатацию. Физический срок службы машин в среднем существенно меньше срока морального износа.

Быстрое развитие науки о надежности в период научно-технической революции связано:

а) с автоматизацией, многократным усложнением машин и их соединением в крупные комплексы;

б) задачами безлюдной технологии;

в) непрерывным форсированием машин, уменьшением их металлоемкости, повышением их силовой, тепловой, электрической напряженности.

В теории надежности рассматриваются следующие обобщенные объекты:

- изделие — единица продукции, выпускаемая предприятием, цехом и т.д. (например, подшипник, ремень, станок, автомобиль);
- элемент — простейшая при данном рассмотрении составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей;
- система — совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Понятия «элемент» и «система» трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Машина, например, при установлении ее собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов — механизмов, деталей и т.д., а при изучении автоматической линии — как элемент.

Различают изделия невосстанавливаемые, которые не могут быть восстановлены потребителем и подлежат замене (например, электрические и электронные лампы, подшипники качения и т.д.), восстанавливаемые, которые могут быть восстановлены потребителем (например, станок, автомобиль, радиоприемник).

Основные понятия и термины надежности стандартизованы.

Работоспособность — состояние изделия, при котором оно способно нормально выполнять заданные функции (с параметрами, установленными в технической документации). Работоспособность не касается требований, непосредственно не влияющих на эксплуатационные показатели, например повреждение окраски и т.д.

Исправность — состояние изделия, при котором оно удовлетворяет всем не только основным, но и вспомогательным требованиям. Исправное изделие обязательно работоспособно.

Неисправность — состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. Различают неисправности, не приводящие к отказам, и неисправности и их сочетания, приводящие к отказам.

Отказ — полная или частичная утрата работоспособности. Различают отказы функционирования, при которых выполнение своих функций рассматриваемым элементом или объектом прекращается (например, поломка зубьев шестерни), и отказы параметрические, при которых некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах (например, потеря точности станка).

Причины отказов подразделяют на случайные и систематические. Случайные причины — это предусмотренные перегрузки, дефекты материала и погрешности изготовления, не обнаруженные контролем, ошибки обслуживающего персонала или сбой системы управления. Примеры: твердые включения в обрабатываемую среду, крупные неровности дороги, наезды на препятствия, недопустимые отклонения размеров заготовок или их неправильный зажим, раковины, закалочные трещины. Случайные факторы преимущественно вызывают отказы при действиях в неблагоприятных сочетаниях.

Систематические причины — это закономерные явления, вызывающие постепенное накопление повреждений: влияние среды, времени, температуры, облучения, коррозия, старение, нагрузки и работа трения — усталость, ползучесть, износ, функциональные воздействия, засорения, залипания, утечки.

В соответствии с этими причинами и характером развития и проявления различают отказы внезапные (поломки от перегрузок, заедания), постепенные по развитию и внезапные по проявлению (усталостные разрушения, перегорания ламп, короткие замыкания из-за старения изоляции) и постепенные (износ, старение, коррозия, залипание). Внезапные отказы вследствие своей неожиданности более опасны, чем постепенные. Постепенные отказы представляют собой выходы параметров за границы допуска в процессе эксплуатации или хранения.

По причинам возникновения отказы можно также разделить на конструкционные, вызванные недостатками конструкции, технологические, вызванные несовершенством или нарушением технологии, и эксплуатационные, вызванные неправильной эксплуатацией.

Отказы в соответствии со своей физической природой бывают связаны с разрушением деталей или их поверхностей (поломки, выкрашивание, износ, коррозия, старение) или не связаны с разрушением (засорение каналов подачи топлива, смазки или подачи рабочей жидкости в гидроприводах, ослабление электроконтактов). В соответствии с этим отказы устраняют: заменой деталей, регулированием или очисткой.

По своим последствиям отказы могут быть легкими — легкоустраняемыми, средними, не вызывающими разрушений других узлов, и тяжелыми, вызывающими тяжелые вторичные разрушения, а иногда и человеческие жертвы.

По возможности дальнейшего использования изделия отказы бывают полные, исключая возможность работы изделия до их устранения, и частичные, при которых изделие может частично использоваться, например, с неполной мощностью или на пониженной скорости.

По сложности устранения различают отказы, устранимые в порядке технического обслуживания; отказы, устранимые в порядке среднего или капитального ремонта и по месту; отказы, устранимые в эксплуатационных и стационарных условиях, что особенно существенно для транспортных машин, в частности для автомобилей.

Встречаются также самоустраняющиеся отказы, например, в системах автоматической подачи заготовок на станках.

По времени возникновения отказы можно подразделить на приработочные, возникающие в первый период эксплуатации и связанные с попаданием на сборку дефектных элементов; при нормальной эксплуатации (за период до появления износных отказов); износные, вызванные старением.

Рассмотрим свойства изделий в аспекте проблемы надежности.

Безотказность (или надежность в узком смысле слова) — свойство непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени или наработки. Это свойство особенно важно для машин, отказ в работе которых связан с опасностью для жизни людей или с перерывом в работе большого комплекса машин, с остановкой автоматизированного производства или с браком дорогого изделия.

Долговечность — свойство изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Предельное состояние изделия характеризуется невозможностью его дальнейшей эксплуатации, снижением эффективности или безопасности. Для невосстанавливаемых изделий понятия долговечности и безотказности практически совпадают.

Ремонтопригодность — приспособленность изделия к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособности путем технического обслуживания и ремонта. С усложнением систем все труднее становится находить причины отказов и отказавшие элементы. Так, в сложных электрогидравлических системах станков поиск причин отказа может занимать более 50 % общего времени восстановления работоспособности. Важность ремонтнопригодности машин определяется огромными затратами на ремонт машин в народном хозяйстве.

Сохраняемость — свойство объекта сохранять значение показателей безотказности, долговечности, ремонтнопригодности после хранения и транспортирования. Практическая роль этого свойства особенно велика для приборов. Так, по американским источникам во время Второй мировой войны около 50 % радиоэлектронного оборудования для военных нужд и запасных частей к нему вышло из строя в процессе хранения.

1.2. Показатели надежности

Показатели надежности различаются в соответствии с компонентами надежности на показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. По восстанавливаемости изделий они делятся на показатели для восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий.

Используют показатели, характеризующие отдельные свойства, и комплексные показатели.

Применяют относительные показатели, характеризующие общий уровень надежности, и абсолютные или числовые показатели, характеризующие отдельные типоразмеры машин.

Надежность изделий в зависимости от их вида может оцениваться частью или всеми показателями надежности.

Показатели безотказности. Вероятность безотказной работы — вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет.

Средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки до отказа невосстанавливаемого изделия. Под наработкой понимают продолжительность или объем выполненной работы объекта.

Средняя наработка на отказ — отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Интенсивность отказов — показатель надежности невосстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказавших в единицу времени (или наработки в других единицах) объектов к числу объектов, оставшихся работоспособными. Этот показатель более чувствителен, чем вероятность безотказной работы, особенно для изделий высокой надежности.

Параметр потока отказов — показатель надежности восстанавливаемых изделий, равный отношению среднего числа отказов восстанавливаемого объекта за произвольную малую его наработку к значению этой наработки (соответствует интенсивности отказов для неремонтируемых изделий, но включает повторные отказы).

Показатели долговечности. Технический ресурс (сокращенно ресурс) — наработка объекта от начала его эксплуатации после ремонта до предельного состояния. Ресурс выражается в единицах времени работы (обычно в часах), длины пути (в километрах) и в единицах выпуска продукции. Для невосстанавливаемых изделий понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

Срок службы — календарная наработка до предельного состояния. Выражается обычно в годах.

Для деталей машин в качестве критерия долговечности используется технический ресурс.

Для машин, эксплуатируемых в разных условиях и имеющих более точный показатель, чем календарный срок службы (в частности, для транспортных машин — пробег, для двигателей — мото­часы), также используется *технический ресурс*. Для других машин используется срок службы.

Показатели ремонтпригодности и сохраняемости. К данным показателям относят: среднее время восстановления работоспособного состояния; вероятность восстановления работоспособного состояния в заданное время; сроки сохраняемости и комплексные показатели, применяемые в основном для автоматических комплексов и сложных систем. Комплексные показатели, в свою очередь, характеризуются коэффициентами:

- технического использования — отношение математического ожидания времени работоспособного состояния за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий времени работоспособного состояния и всех простоев для ремонтов и технического обслуживания;
- готовности — вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме периодов, в которых эксплуатация не предусматривается. Коэффициент определяют как отношение математических ожиданий времени нахождения в работоспособном состоянии к математическим ожиданиям суммы этого времени и времени внепланового ремонта.

1.3. Случайные величины и их характеристики

Внезапные отказы определяются случайными неблагоприятными сочетаниями нескольких факторов. Случайность связана с тем, что причины события остаются для нас скрытыми. Рассеяние ресурсов по критерию усталости (оцениваемое отношением наибольшего ресурса к наименьшему) для подшипников достигает 40, для зубчатых передач — 10...15. Рассеяние ресурсов по износу также весьма значительно. Существенные рассеяние имеют действующие нагрузки, механические характеристики материалов и деталей, зазоры и натяги. Поэтому в расчетах надежности многие параметры должны рассматриваться случайными величинами, т. е. такими, которые могут принять то или иное значение, неизвестное заранее. Они могут быть непрерывного или прерывного (дискретного) типа.

Для каждого числа x в диапазоне изменения случайной величины X существует определенная вероятность $p(X < x)$, что X не превосходит x . Эта зависимость $F(x) = p(X < x)$ называется *функцией распределения* или функцией вероятности случайной величины X .

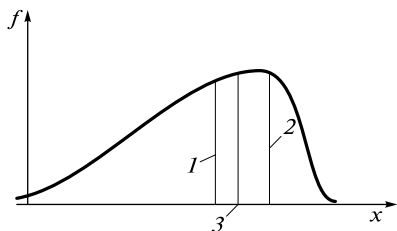


Рис. 1.1. Плотность вероятности и числовые характеристики центра группирования случайной величины:

1 — медиана; 2 — мода; 3 — математическое ожидание

Функция $F(x)$ является неубывающей функцией x (монотонно возрастающей для непрерывных процессов и ступенчато возрастающей для дискретных процессов). В пределах изменения случайной величины X она изменяется от 0 до 1.

Производная от функции распределения по текущей переменной $f(x) = \frac{dF(x)}{dx}$ называется *плотностью распределения*. Она характеризует частоту повторений данного значения случайной величины. В задачах надежности ее широко используют в качестве плотности вероятности.

В ряде случаев достаточно характеризовать распределение случайной величины некоторыми случайными величинами (рис. 1.1): математическим ожиданием (средним значением), модой и медианой, характеризующими положение центров группирования случайных величин по числовой оси, дисперсией, средним квадратическим отклонением, коэффициентом вариации, характеризующими рассеяния случайной величины.

Характеристики распределений используются в статистической трактовке (для обработки результатов наблюдений) и в вероятностной трактовке (для прогнозирования надежности).

Математическое ожидание (среднее значение) m_x — основная и простейшая характеристика случайной величины x . Значение математического ожидания, определяемое по результатам наблюдений как для дискретных, так и для непрерывных величин, называют оценкой математического ожидания или оценкой среднего значения \bar{x} :

$$\bar{x} = \sum_1^N \frac{x_i}{N} \quad (1.1)$$

или

$$\bar{x} = \sum_1^N \frac{g_i x_i}{N}, \quad (1.2)$$

где N — общее число наблюдений; x_i — значение случайной величины; g_i — число одинаковых значений x_i . Черта над обозначением случайной величины означает среднее значение.

В формуле (1.1) суммируют все N членов, а в формуле (1.2) — число членов с разными значениями x_i . При достаточно большом числе наблюдений (испытаний) полагают, что $m_x = \bar{x}$.

В вероятностных задачах математическое ожидание определяют в зависимости от плотности распределения $f(x)$ (для непрерывных величин) или вероятности p_i появления значений x_i (для дискретных величин):

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx; \quad m_x = \sum_1^N p_i x_i. \quad (1.3)$$

Дисперсия случайной величины — математическое ожидание квадрата отклонения этой величины от ее математического ожидания.

Оценка дисперсии случайной величины — среднее значение квадрата разности между значениями случайной величины и ее средним значением:

$$D_x^* = \frac{1}{N-1} \sum_1^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.4)$$

или

$$\frac{1}{N-1} \sum_1^N g_i (x_i - \bar{x})^2. \quad (1.5)$$

Слово «дисперсия» означает рассеяние и характеризует разброс случайной величины.

Для непрерывных случайных величин

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx. \quad (1.6)$$

Для дискретных случайных величин

$$D_x = \sum (x_i - m_x)^2 p_i. \quad (1.7)$$

Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины. Поскольку удобнее пользоваться характеристикой рассеяния, имеющей ту же размерность, что и случайная величина, то была введена характеристика — среднее квадратическое отклонение, представляющее собой корень квадратный из дисперсии,

$$S_x = \sqrt{D_x}.$$

Для оценки рассеяния с помощью безразмерной (относительной) величины используют коэффициент вариации, равный отношению среднего квадратического отклонения к математическому ожиданию:

$$v_x = S_x / m_x.$$

Дисперсия и среднее квадратическое отклонение являются гораздо более репрезентативными характеристиками рассеяния, например среднее арифметическое абсолютных значений отклонений.

Квантиль — это среднее значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности. Квантиль, соответствующая вероятности 0,5, называется *медианой*. Медиана характеризует расположение центра группирования случайной величины. Площадь под графиком функции плотности распределения делится медианой пополам.

Для характеристики рассеяния случайной величины используют также вероятностное отклонение, равное половине разности квантилей $x_{0,75}$ и $x_{0,25}$, т.е. значений случайной величины, соответствующих вероятностям 0,75 и 0,25.

Мода случайной величины — наиболее вероятное значение или, иначе, то ее значение, при котором плотность вероятности максимальна.

Аналогично с предыдущими характеристиками трансформируются термины «мода» и «медиана» в статистической трактовке. Для симметричного модального (т.е. имеющего один максимум) распределения математическое ожидание, мода и медиана совпадают.

1.4. Оценка параметров надежности

Существенное рассеяние основных параметров надежности предопределяет необходимость рассматривать ее в вероятностном аспекте.

Как было показано ранее на примере характеристик распределений, параметры надежности используются в статистической трактовке для оценки состояния и в вероятностной трактовке — для прогнозирования. Первые выражаются в дискретных числах, их в теории вероятностей и математической теории надежности называют *оценками*. При достаточно большом количестве испытаний они принимаются за истинные характеристики надежности.

Рассмотрим проведенные для оценки надежности испытания или эксплуатацию значительного числа N элементов в течение

времени t (или наработки в других единицах). Пусть к концу испытания или срока эксплуатации останется N_p работоспособных (неотказавших) элементов и n отказавших.

Тогда относительное число отказов

$$q(t) = n / N.$$

Если испытание проводится как выборочное, то $q(t)$ можно рассматривать как статистическую оценку вероятности отказа или, если N достаточно велико, как вероятность отказа.

В дальнейшем в случаях, когда необходимо подчеркивать отличие оценки вероятности от истинного значения вероятности, оценка будет дополнительно помечаться знаком «*», в частности $q^*(t)$.

Вероятность безотказной работы оценивается относительным числом работоспособных элементов

$$p(t) = \frac{N_p}{N} = 1 - \frac{n}{N}. \quad (1.8)$$

Поскольку безотказная работа и отказ — взаимно противоположные события, то сумма их вероятностей равна 1:

$$p(t) + q(t) = 1.$$

Это же следует из приведенных ранее зависимостей:

при $t = 0$ $n = 0$, $q(t) = 0$ и $p(t) = 1$;

при $t = \infty$ $n = N$, $q(t) = 1$ и $p(t) = 0$.

Распределение отказов по времени характеризуется функцией плотности распределения $f(t)$ наработки до отказа. В статистической трактовке

$$f(t) = \frac{\Delta n}{N \Delta t} = \frac{\Delta q(t)}{\Delta t}, \quad (1.9)$$

в вероятностной трактовке

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt}.$$

Здесь Δn и $\Delta q(t)$ — приращение числа отказавших объектов и соответственно вероятности отказов за время Δt .

Вероятности отказов и безотказной работы в функции плотности $f(t)$ выражаются следующими зависимостями:

$$q(t) = \int_0^t f(t) dt; \quad \text{при } t = \infty \quad q(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = 1; \quad (1.10)$$

$$p(t) = 1 - q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt. \quad (1.11)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ в отличие от плотности распределения относится к числу объектов N_p , оставшихся работоспособными, а не к общему числу объектов. Соответственно в статистической трактовке

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{N_p \Delta t} \quad (1.12)$$

и в вероятностной трактовке, учитывая, что $N_p/N = p(t)$,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}. \quad (1.13)$$

Получим выражение для вероятности безотказной работы в зависимости от интенсивности отказов. Для этого в выражение (1.13) подставим $f(t) = -\frac{dp(t)}{dt}$, разделим переменные и проинтегрируем:

$$\frac{dp(t)}{p(t)} = -\lambda(t)dt; \ln p(t) = -\int_0^t \lambda(t)dt; \quad (1.14)$$

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \quad (1.15)$$

Соотношение (1.15) является одним из основных уравнений теории надежности.

К числу важнейших общих зависимостей надежности относятся зависимости надежности систем от надежности элементов.

Рассмотрим надежность наиболее характерной для машиностроения простейшей расчетной модели системы из последовательно соединенных элементов (рис. 1.2), у которой отказ каждого элемента вызывает отказ системы, а отказы элементов принимаются независимыми.

Используем известную теорему умножения вероятностей, согласно которой вероятность произведения, т.е. совместного проявления независимых событий, равна произведению вероятностей

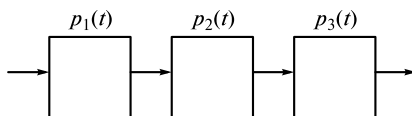


Рис. 1.2. Структурная схема надежности последовательной системы

этих событий. Следовательно, вероятность безотказной работы системы равна произведению вероятностей безотказной работы отдельных элементов:

$$p_c(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t). \quad (1.16)$$

Если $p_1(t) = p_2(t) = \dots = p_n(t)$, то $p_c(t) = p_1^n(t)$, поэтому надежность сложных систем получается низкой. Например, если система состоит из 10 элементов с вероятностью безотказной работы 0,9 (как в подшипниках качения), то общая вероятность составляет $0,9^{10} \approx 0,35$.

Обычно вероятность безотказной работы элементов достаточно высокая, поэтому, выразив $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$ через вероятности отказов и пользуясь теорией приближенных вычислений, получим

$$p_c(t) = [1 - q_1(t)][1 - q_2(t)]\dots[1 - q_n(t)] \approx \approx 1 - [q_1(t) + q_2(t) + \dots + q_n(t)], \quad (1.17)$$

так как произведениями двух малых величин можно пренебречь. При $q_1(t) = q_2(t) = \dots = q_n(t)$ получаем $p_c = 1 - nq_1(t)$. Пусть в системе из шести одинаковых последовательных элементов $p_1(t) = = 0,99$, тогда $q_1(t) = 0,01$ и $p_c(t) = 0,94$.

Вероятность безотказной работы нужно уметь определять для любого промежутка времени. По теореме умножения вероятностей

$$p(T + t) = p(T)p(t) \text{ или } p(t) = \frac{p(T + t)}{p(T)}, \quad (1.18)$$

где $p(T)$ и $p(T + t)$ — вероятности безотказной работы за время T и $T + t$ соответственно; $p(t)$ — условная вероятность безотказной работы за время t (термин «условная» здесь введен, поскольку предполагается, что изделия не имели отказа до начала интервала времени или наработки).

1.5. Различные периоды работы технических устройств

При рассмотрении работоспособности какого-либо технического устройства или изделия различают три периода его «жизни»: период приработки, когда при испытании устройства или изделия происходит отбраковка конструктивных, технологических и производственных дефектов, период нормальной эксплуатации, ха-

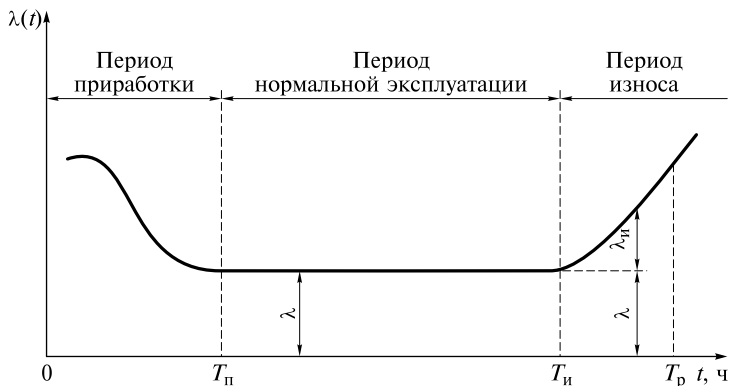


Рис. 1.3. Функция интенсивности $\lambda(t)$ отказов экспоненциального распределения

характеризующийся внезапными отказами приблизительно постоянной интенсивности, и период старения, когда появляются отказы возрастающей интенсивности, вызываемые износом устройства или изделия (рис. 1.3).

Из всех этих периодов «жизни» технического устройства главным является период нормальной эксплуатации, который характеризуется длительной работой устройства или машины при определенных климатических и других условиях применения.

Период нормальной эксплуатации устройства. В период нормальной эксплуатации технического устройства обычно происходят внезапные отказы, которые носят случайный характер. Физическая природа таких отказов обусловлена внезапной концентрацией нагрузок, действующих внутри и вне устройства. Случайность возникновения внезапных отказов проявляется в том, что события происходят неожиданно и нерегулярно. Однако в достаточно большие и приблизительно равные промежутки времени они повторяются примерно с одинаковой интенсивностью.

После периода приработки устройства, в котором интенсивность отказов повышенная, наступает период нормальной эксплуатации, в течение которого имеет место наиболее низкий уровень интенсивности внезапных отказов приблизительно постоянной величины. В этом случае экспоненциальная зависимость во времени надежности по уравнению (1.15) служит достаточной аппроксимацией событий.

На рис. 1.3 представлена примерная кривая зависимости интенсивности отказов в работе технического устройства λ от времени эксплуатации t для трех характерных периодов его работы: периода приработки, периода нормальной эксплуатации и перио-

да износа. К такому устройству может быть отнесена и электрическая машина. Как показывает эта кривая, в начале периода приработки машины интенсивность отказа в ее работе может быть высока, затем она падает, и к моменту времени $t = T_{\text{п}}$ — началу периода нормальной эксплуатации — интенсивность отказов становится минимальной и в среднем приблизительно постоянной величиной

$$\lambda \approx 1/T_{\text{ср}},$$

где $T_{\text{ср}}$ — средняя наработка до первого отказа машины или устройства, ч.

Когда время эксплуатации машины или устройства достигает значения $t = T_{\text{и}}$, начинает сказываться износ их частей. С этого момента интенсивность отказов в работе начинает быстро возрастать, так что за период работы машины или устройства с $T_{\text{и}}$ до $T_{\text{р}}$ вероятность отказов их может достигнуть примерно 0,5, или 50 %. Время $T_{\text{р}}$ можно назвать средним значением времени долговечности машины или устройства с учетом износа, или их техническим ресурсом, при условии отсутствия ремонта. Однако при проведении ремонта машины или устройства путем замены изношенных частей и исправления других дефектов срок службы их может быть соответственно увеличен.

Время эксплуатации машины или устройства $T_{\text{и}}$ при постоянной интенсивности отказов в работе λ всегда меньше долговечности, или технического ресурса $T_{\text{р}}$. Вместе с тем среднее время безотказной работы машины, или средняя наработка до первого отказа, $T_{\text{ср}} = 1/\lambda$ обычно гораздо больше, чем ее долговечность, или технический ресурс $T_{\text{р}}$. Например, если в течение периода нормальной эксплуатации интенсивность внезапных отказов в работе машины или устройства λ невелика, то значение времени $T_{\text{ср}}$ может достигать очень большой величины, измеряемой нередко десятками или сотнями тысяч часов. Это время указывает, насколько надежна машина или устройство в период нормальной эксплуатации t .

Период износа устройства. Высокую надежность технического устройства, в том числе и электрической машины, на продолжительный период можно обеспечить посредством соответствующей приработки, которая позволяет исключить приработочные отказы, и с помощью профилактического ремонта устройства путем замены изношенных частей и исправления других его дефектов.

Высокая надежность технического устройства — это низкая интенсивность отказов в работе и, следовательно, большое среднее время безотказной работы, или средняя наработка до первого отказа $T_{\text{ср}}$. Время $T_{\text{ср}}$ (рис. 1.4) — некоторое среднее время, за ко-

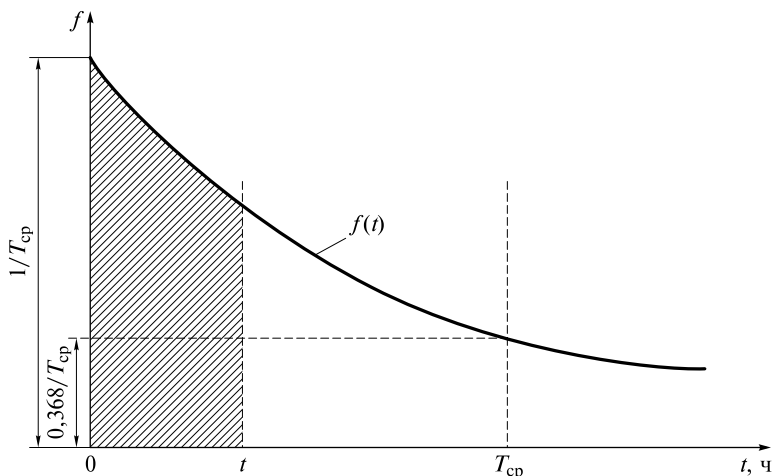


Рис. 1.4. График плотности вероятности $f(t)$ и среднее время безотказной работы $T_{ср}$

торое возникает отказ в работе устройства. Поскольку это только среднее время, то на практике следует ожидать, что в некоторых случаях отказы в работе устройства могут возникать значительно раньше этого времени, а в других — позже его. Поэтому в общем случае нельзя считать, что техническое устройство или машина будет безотказно работать обязательно все $T_{ср}$ часов. Надежная работа устройства реально получается только для интервала времени, значительно меньшего средней наработки до первого отказа $T_{ср}$.

Как указывалось ранее, внезапные отказы технического устройства постоянной интенсивности подчиняются экспоненциальному распределению, а износные отказы после периода нормальной эксплуатации $T_{и}$ (см. рис. 1.3) — приблизительно нормальному распределению во времени. Плотность вероятности отказов $f(t)$, представляющая собой (см. рис. 1.4) степень убывания надежности $p(t)$ во времени, будет иметь следующий вид для указанных распределений. Так, например, для внезапных отказов устройства их плотность вероятности

$$f(t) = \frac{1}{T_{ср}} e^{-\frac{t}{T_{ср}}}, \quad (1.19)$$

где t — время работы устройства, ч.

Плотность же вероятности износных отказов $f(T)$ с учетом обозначений, принятых на рис. 1.3, будет

$$f(T) = \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}}}{\sigma \left[1 + \Phi \left(\frac{T_p}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right]} e^{-\frac{(T-T_p)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.20)$$

где T — общее время эксплуатации или работы технического устройства, ч; T_p — среднее значение долговечности, или технический ресурс устройства, ч; σ — среднее квадратическое отклонение времени между отказами, или стандартное отклонение от среднего значения долговечности, или технического ресурса, T_p ;

$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T - T_p)^2}{r}}$, при этом r — число отказов в работе устройства,

происходящих спустя время T , которые суммируются в выражении $\sum_T (T - T_p)^2$; $\Phi \left(\frac{T_p}{\sigma\sqrt{2}} \right)$ — интеграл вероятности, определяемый по

справочникам для значения $\frac{T_p}{\sigma\sqrt{2}}$.

На рис. 1.4 представлена кривая плотности вероятности внезапных отказов $f(T)$ устройств для экспоненциального распределения, а на рис. 1.5 — кривая плотности износных отказов $f(T)$ для нормального распределения. Вероятность внезапного отказа в работе устройства для промежутка времени от 0 до t будет представлять собой определенный интеграл от плотности вероятности отказов $f(t)$ из уравнения (1.9) в пределах от 0 до t :

$$q(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-t/T_{cp}}, \quad (1.21)$$

т.е. вероятность внезапного отказа устройства численно будет определяться заштрихованной площадью под кривой плотности вероятности отказов $f(t)$ (см. рис. 1.5). Общая площадь под этой кривой за бесконечно большой промежуток времени для экспоненциального случая $f(t)$ будет

$$q(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt = 1 - e^{-t/T_{cp}} \Big|_0^{\infty} = 1. \quad (1.22)$$

Следовательно, вероятность отказа в работе устройства за этот промежуток времени равна 100 %.

Приработочные отказы устройства. Рассмотренные ранее два периода жизни технического устройства — период нормальной

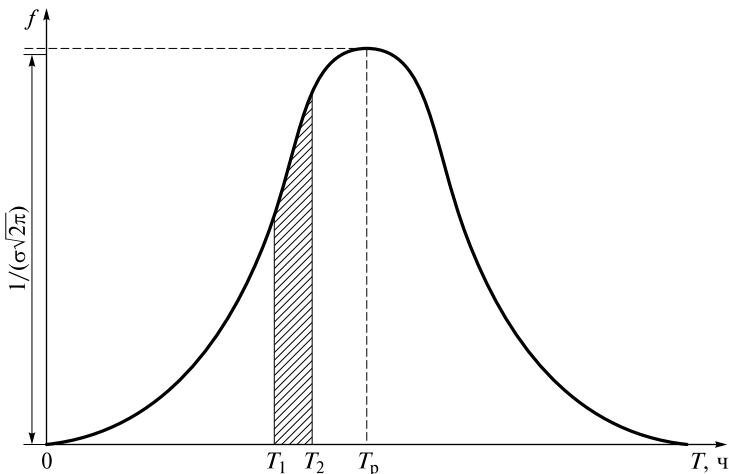


Рис. 1.5. Кривая плотности износовых отказов $f(T)$ для нормального распределения:

T_p — среднее время нормальной работы группы (партии) изделий; T_1 и T_2 — времена начала износовых отказов для конкретных двух изделий из партии

эксплуатации и период износа — характеризуют собой соотношение работоспособности и надежности его с внезапными и износовыми отказами в работе (см. рис. 1.3). Период нормальной эксплуатации соответствует работе устройств как однократного, так и многократного использования, период же износа относится только к ремонтируемым устройствам многократного использования.

Последние периодически проходят необходимый ремонт, во время которого производится замена изношенных или дефектных частей. Эти два периода жизни технического устройства являются главными для характеристики его надежности.

Однако, кроме внезапных и износовых отказов в работе какого-либо устройства, существуют еще приработочные отказы, которые могут также оказывать некоторое неблагоприятное влияние на его надежность. Для ряда технических устройств приработочные отказы устраняются в течение первого периода работы устройства обычно путем замены дефектных деталей исправными или их приработки, если это допускается конструкцией устройства. Например, в коллекторных или других электрических машинах перед выпуском их с промышленного предприятия-изготовителя в нормальную эксплуатацию предварительно производится притирка и приработка щеток на коллекторе или контактных кольцах, проверка состояния изоляции обмоток, наладка подшипниковых узлов и выполняются другие контрольные испытания машин.