

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Ю.М ПРАВИКОВ, Г.Р. МУСЛИНА

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

Ульяновск
УлГТУ
2015

УДК 621.002.5–192

ББК 34.5 – 060.1 + 30.14 я 73

П 00

Рецензенты:

кафедра «Технологии» Ульяновского государственного педагогического университета им. И. Н. Ульянова,

технический директор ООО «БАУ–РУСМотор Корпорэйшн», С. Е. Ведров, канд. техн. наук

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

П 00 Правиков, Ю. М.

Основы теории надежности технологических процессов в машиностроении : учебное пособие / Ю. М. Правиков, Г. Р. Муслина. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 122 с.

ISBN 978-5-388-00606-6

Приведены исходные теоретические положения и лабораторный практикум по основным разделам дисциплины «Основы теории надежности технологических процессов в машиностроении».

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистров 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Пособие будет полезно также студентам, обучающимся по направлению 15.03.01 и специальности 23.05.01 и изучающим теорию надежности оборудования, транспортных средств и технологию их изготовления.

УДК 621.002.5–192

ББК 34.5 – 060.1 + 30.14 я 73

ISBN 978-5-388-00606-6

© Правиков Ю. М., Муслина Г. Р., 2015

© Оформление. УлГТУ, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И АББРЕВИАТУРЫ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ	7
1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ	9
1.1. Общие понятия о надежности технологических процессов изготовления деталей	9
1.2. Техническое состояние и работоспособность изделия	10
1.3. Изменение состояния изделия. Классификация отказов	13
1.4. Свойства надежности	16
1.5. Количественные показатели надежности	17
1.5.1. Показатели безотказности	18
1.5.2. Показатели долговечности	26
1.5.3. Показатели сохраняемости	28
1.5.4. Показатели ремонтпригодности	28
1.5.5. Комплексные показатели надежности	29
1.6. Схема формирования параметрического отказа	30
1.7. Законы распределения наработки до отказа	32
Контрольные вопросы	38
2. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	39
2.1. Причины потери работоспособности технологической системы	39
2.2. Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей	40
2.2.1. Геометрические параметры	41
2.2.2. Физико-механическое состояние поверхностного слоя	47
2.3. Закономерности изнашивания сопрягаемых деталей	50
2.4. Оценка надежности по критерию износостойкости	61
Контрольные вопросы	65
3. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЯЕМОЙ ПРОДУКЦИИ	67
3.1. Общие положения по оценке надежности технологических систем	67
3.2. Оценка надежности технологических систем по параметрам точности	69
3.2.1. Условия надежности ТС	69

3.2.2. Расчетный метод определения показателей точности ТС	71
3.2.3. Опытно-статистический метод	73
3.2.4. Метод квалитетов	75
3.3. Оценка надежности технологической системы по выполнению заданий по параметрам качества изготавливаемой продукции . . .	76
3.3.1. Расчетный метод	76
3.3.2. Опытно-статистический метод	81
Контрольные вопросы	82
4. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ	84
4.1. Показатели качества измерительных процессов	84
4.2. Методика проведения анализа качества измерительного процесса	90
4.2.1. Общие положения	90
4.2.2. Расчет сходимости и воспроизводимости измерительного процесса методом средних и размахов	94
4.2.3. Оценивание приемлемости измерительного процесса	95
Контрольные вопросы	98
5. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	99
Лабораторная работа № 1. Исследование влияния технологической подготовки поверхностей на износостойкость и показатели надежности деталей	99
Лабораторная работа № 2. Исследование надежности ТС по параметрам качества изготавливаемой продукции	101
Лабораторная работа № 3. Оценивание приемлемости измерительного процесса	104
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	108
ОСНОВНЫЕ ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПОНЯТИЯ (ГЛОССАРИЙ)	110
ПРИЛОЖЕНИЯ 1 – 4	113
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	121

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И АББРЕВИАТУРЫ

СИ	– средство измерения;
СКО	– среднее квадратическое отклонение;
ТП	– технологический процесс;
ТПП	– технологическая подготовка производства;
ТС	– технологическая система;
<i>A</i>	– стационарный коэффициент готовности;
<i>A(t)</i>	– мгновенный коэффициент готовности;
<i>A₀</i>	– коэффициент оперативной готовности;
<i>A_{ТИ}</i>	– коэффициент технического использования;
<i>AV</i>	– воспроизводимость результатов измерений;
<i>EV</i>	– сходимость (повторяемость) результатов измерений;
<i>PV</i>	– изменчивость контролируемого параметра образца;
<i>R & R</i>	– сходимость и воспроизводимость результатов измерений;
<i>TV</i>	– полная изменчивость измерительного процесса;
<i>B</i>	– абсолютное значение смещения среднего арифметического значения измеряемой величины;
<i>f_c</i>	– коэффициент трения скольжения;
<i>f_M</i>	– молекулярная составляющая коэффициента трения;
<i>F(t)</i>	– функция распределения наработки до отказа;
<i>f(t)</i>	– плотность распределения наработки до отказа;
<i>I</i>	– интенсивность изнашивания;
<i>K_{пд}</i>	– коэффициент передачи дефекта;
<i>K_c</i>	– коэффициент смещения;
<i>K_T</i>	– коэффициент точности;
<i>m₀</i>	– математическое ожидание погрешности настройки ТС;
<i>m_{x(t)}</i>	– математическое ожидание мгновенной погрешности обработки;
<i>N</i>	– число исправно работающих изделий;
<i>N(t)</i>	– накопленное число исправно работающих изделий;
<i>n(t)</i>	– накопленное число отказавших изделий;
<i>P(t)</i>	– вероятность безотказной работы;
<i>PV</i>	– изменчивость образцов;
<i>R</i>	– размах результатов измерений;
<i>Ra</i>	– среднее арифметическое отклонение профиля;
<i>Rz</i>	– высота неровностей профиля по десяти точкам;
<i>Rmax</i>	– наибольшая высота неровностей профиля;
<i>r</i>	– приведенный радиус неровностей;

S	– средний шаг местных выступов профиля;
S_m	– средний шаг неровностей профиля;
S_w	– средний шаг волнистости;
S_e	– оценка СКО сходимости измерительного процесса;
S_0	– оценка СКО воспроизводимости измерительного процесса;
S_p	– оценка СКО изменчивости контролируемого параметра образца;
S_x	– оценка СКО контролируемого параметра;
T	– допуск контролируемого параметра;
t	– наработка;
\bar{t}	– наработка до отказа;
t_0	– наработка на отказ;
$t_{\text{в}}$	– среднее время восстановления;
tp	– относительная опорная длина профиля;
t_p	– коэффициент Стьюдента;
t_{pu}	– технический ресурс по критерию износа;
t_{γ}	– гамма-процентный ресурс;
U	– линейный износ;
$U_{\text{пред}}$	– предельный износ;
UCL и LCL	– верхняя и нижняя контролируемые границы;
USL и LSL	– верхняя и нижняя границы поля допуска;
u_p	– квантиль;
V	– скорость относительного скольжения деталей;
V_u	– скорость изнашивания;
W_{max}	– наибольшая высота волнистости;
W_z	– высота волнистости;
\bar{x}	– среднее арифметическое значение контролируемого параметра;
x_0	– значение параметра, соответствующее середине поля допуска;
$x_{\text{в}}$ и $x_{\text{н}}$	– наибольшее и наименьшее значение контролируемого параметра;
$\bar{x}(t)$	– среднее арифметическое значение контролируемого параметра в момент времени t ;
$z(t)$	– мгновенный параметр потока отказов;
$\Gamma(x)$	– гамма-функция;
$\Phi(z)$	– Функция Лапласа;
$\lambda(t)$	– интенсивность отказов;
ω	– погрешность (поле рассеяния) контролируемого параметра.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Производство любых изделий, в том числе машиностроения, связано с широким использованием различных технологических систем (ТС), необходимых для реализации тех или иных технологических процессов (ТП) и управления ими. Современные ТС характеризуются сложностью выполняемых функций и ответственностью решаемых задач. Повышение сложности, многофункциональности и ответственности ТС неизбежно выдвигает на первый план проблему обеспечения их надежности.

Надежность ТП и ТС определяется одним и тем же их свойством – возможностью изготавливать продукцию в заданном объеме, сохраняя во времени установленные параметры ее качества. Поэтому вопросы оценки надежности ТС и ТП по параметрам качества изготавливаемой продукции имеют первостепенное значение, как при выборе вариантов ТС и ТП на этапе технологической подготовки производства (ТПП), так и для устранения причин, отрицательно влияющих на качество продукции в процессе ее изготовления.

Неотъемлемой частью любого ТП является измерительный процесс. Для обеспечения изготовления изделий заданного качества и надежного управления технологическим процессом большое значение приобретает качество измерительного процесса. Важным является анализ приемлемости измерительного процесса, основанный на результатах его исследования в реальных производственных условиях с учетом всего многообразия влияющих на качество измерений факторов.

Уровень надежности ТС, как и других изделий, устанавливается на всех этапах жизненного цикла: на этапе проектирования – закладывается в проект, при изготовлении – обеспечивается; на этапе эксплуатации – реализуется.

В этих условиях подготовка магистрантов по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» невозможна без изучения вопросов, связанных с оценкой уровня надежности ТС и ТП, позволяющей:

- обосновать количественные требования к надежности ТС и ТП;
- выполнить сравнительный анализ вариантов ТС и ТП;
- определить достигнутый или ожидаемый уровень надежности ТС и ТП;

- обосновать эффективность мероприятий, направленных на обеспечение надежности ТС и ТП;

- проверить соответствие уровня надежности ТС и ТП установленным требованиям.

Учебное пособие содержит основные положения и лабораторный практикум по дисциплине «Основы теории надежности технологических процессов в машиностроении», процесс изучения которой направлен на формирование следующих компетенций:

- способность разрабатывать на основе действующих стандартов, регламентов методические и нормативные документы, техническую документацию, а также предложения и мероприятия по реализации выполненных проектов (ПК-12);

- проводить анализ состояния и динамики функционирования машиностроительных производств и их элементов с использованием надлежащих современных методов и средств анализа (ПК-20);

- способность разрабатывать мероприятия по обеспечению надежности и безопасности производства, стабильности его функционирования (ПК-26).

1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Общие понятия о надежности технологических процессов изготовления изделий

В соответствии со стандартом ГОСТ 3.1109 «ЕСТД. Термины и определения основных понятий» *технологический процесс* – это часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия людей и орудий производства по созданию и (или) определению состояния предмета труда. Технологический процесс осуществляют с помощью технологической системы.

Технологическая система – совокупность функционально связанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных ТП или операций (ГОСТ 27.004 «Системы технологические. Термины и определения»).

Различают четыре вида (уровня) ТС:

- ТС технологической операции;
- ТС технологического процесса;
- ТС, действующие в пределах производственного подразделения;
- ТС предприятия.

Под надежностью ТП понимают его свойство обеспечивать изготовление продукции в заданном объеме, сохраняя во времени установленные требования к ее качеству [4]. Это же свойство определяет надежность ТС.

Оценку надежности ТС осуществляют в соответствии со стандартами и методическими указаниями:

- ГОСТ 27.202. Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции;
- ГОСТ 27.203. Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности;
- РД 50-706. Методические указания. Надежность в технике. Методы контроля надежности изделий по параметрам технологического процесса их изготовления.

Оценка надежности ТС производится на стадиях их проектирования, изготовления (разрабатываемые ТС) и на стадии эксплуатации (действующие ТС). Цель оценки надежности на первых двух стадиях – оптимизация надежности вновь проектируемых ТС, а на стадии эксплуатации – поддержание необходимого уровня надежности действующих систем.

Оценка надежности действующих ТС включает:

- определение фактических показателей надежности;
- проверку выполнения требований по надежности.

Результаты оценки надежности действующих ТС должны использоваться для нормирования показателей надежности разрабатываемых ТС.

Результаты оценки надежности вновь создаваемых ТС используют для:

- оптимизации технологических маршрутов и режимов обработки;
- выбора средств технологического оснащения;
- устранения нарушений ритма выпуска;
- определения периодичности замены инструмента;
- устранения факторов, приводящих к отказам ТС.

Для оценки надежности ТС необходимо иметь представление о ее техническом состоянии, свойствах и показателях надежности, закономерностях отказов. Рассмотрению этих вопросов посвящена теория надежности.

1.2. Техническое состояние и работоспособность изделия

Основные термины и определения теории надежности, в том числе и понятие надежности, установлены ГОСТ Р 27.002 «Надежность в технике. Термины и определения», который введен в действие с 1 января 2011 г.

В этом стандарте использован обобщенный термин «изделие», под которым понимают любую функциональную единицу, которую можно рассматривать в отдельности. Примерами изделий могут быть система, подсистема, оборудование, устройство, аппаратура, узел, деталь, элемент. В соответствии с этим определением ТС можно рассматривать, как изделие, предназначенное для выполнения ТП и операций. Поэтому далее термин «изделие» используется применительно к ТС и ее составляющим.

В теории надежности изделия разделяют на восстанавливаемые и невосстанавливаемые.

Восстанавливаемое изделие – это изделие, которое при данных условиях после отказа может быть возвращено в состояние, в котором оно может выполнять требуемую функцию. «Данные условия» могут включать климатические, технические или экономические обстоятельства.

К параметрам, характеризующим способность изделия выполнять требуемые функции, относят кинематические и динамические параметры, показатели точности функционирования, производительности, скорости и т.п.

В противном случае, если изделие не может быть возвращено в состояние, в котором оно способно выполнять требуемую функцию, изделие является **невосстанавливаемым**.

Примерами восстанавливаемых изделий являются ТС и большинство составляющих ее элементов (механизмов и деталей), невосстанавливаемых – прокладки, манжеты, подшипники и др. Некоторые из указанных изделий, например, подшипники, в принципе, можно восстанавливать, но это не выгодно.

Готовность – это способность изделия выполнять требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены. «Данные условия» могут включать климатические, технические или экономические обстоятельства. Необходимые внешние ресурсы (например, наличие источников энергии, квалифицированного персонала и др.), кроме ресурсов технического обслуживания, не влияют на свойство готовности.

Надежность – это свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания.

Надежность как свойство готовности характеризует и позволяет количественно оценить:

- текущее состояние изделия, в том числе ТС, ее механизмов и деталей;
- скорость изменения показателей качества ТС при ее работе в определенных условиях эксплуатации.

Важным с точки зрения надежности является рассмотрение возможных состояний изделия, к которым в первую очередь относятся работоспособное и неработоспособное состояния.

Работоспособное состояние – это состояние изделия, при котором оно способно выполнять требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы. Примером внешних ресурсов для ТС являются наличие соответствующих источников энергии, квалифицированного персонала и др.

Неработоспособное состояние – это состояние изделия, при котором оно неспособно выполнить требуемую функцию по любой причине. Причина может быть внутренней или внешней. Неработоспособное состояние по внутренней причине возможно, если изделие не способно выполнить требуемую функцию из-за внутренней неисправности или профилактического технического обслуживания. Неработоспособное состояние по внешней причине возникает при неспособности изделия выполнять требуемую функцию из-за отсутствия или нехватки внешних ресурсов. Например, неспособность металлорежущего станка выполнять требуемую функцию из-за отключения внешнего энерго-снабжения.

Работоспособное состояние ТС предусматривает обеспечение значений показателей качества изготавливаемой продукции, производительности, материальных и стоимостных затрат на изготовление продукции в соответствии с нормативно-технической, конструкторской и технологической документацией. Например, ТС работоспособна по параметрам производительности, если она обеспечивает выполнение задания в установленное время.

Для технологов наибольший интерес представляет обеспечение работоспособного состояния ТС по параметрам качества и производительности, поэтому в дальнейшем эти вопросы будут рассмотрены более подробно.

Следует отметить, что ТС в одно и то же время может находиться в работоспособном состоянии по обеспечению параметров качества и в неработоспособном состоянии по обеспечению параметров производительности, или наоборот.

В сложных системах, к которым относится ТС, принято деление состояний изделия с выделением промежуточных состояний с понижением уровня качества функционирования. Стандартом ГОСТ Р 27.002 предусмотрены такие промежуточные состояния, как предельное и критическое.

Предельное состояние – это состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по причинам безопасности, экономическим, экологическим.

Критическое состояние – это состояние изделия, которое может привести к тяжелым последствиям: травмированию людей, значительному материальному ущербу или неприемлемым экологическим последствиям.

Предельное и критическое состояния обусловлены тем обстоятельством, что начиная с некоторого момента времени, дальнейшее применение по назначению пока еще работоспособного изделия оказывается недопустимым по указанным выше причинам. Переход изделия в предельное или критическое состояние происходит раньше возникновения отказа. Для невосстанавливаемых изделий наступление предельного или критического состояния влечет за собой прекращение применения изделия по назначению. Для восстанавливаемых изделий при наступлении предельного или критического состояния требуется либо восстановление изделия (отправка изделия в капитальный или средний ремонт, т.е. временное прекращение применения изделия по назначению), либо, в случае невозможности восстановления, предполагается окончательное прекращение применения изделия.

Примером предельного состояния ТС является механический износ направляющих до предельно допустимого уровня, после достижения которого может произойти отказ по параметрам качества изготавливаемой продукции. Критерием предельного состояния может также служить превышение установленного уровня затрат на техническое обслуживание и ремонт ТС, определяющие экономическую нецелесообразность дальнейшей ее эксплуатации.

Для обеспечения надежности ТС используют резервирование.

Резервирование – это способ повышения надежности изделия путем включения резервных элементов, способных в случае отказа основного элемента выполнить его функции. Этот способ обладает возможностями получения заданных уровней надежности и имеет широкое практическое применение. Одним из примеров резервирования является использование накопителей заготовок в автоматизированном производстве.

1.3. Изменение состояния изделия. Классификация отказов

Изменение состояния изделия может происходить вследствие отказа, появления неисправности или повреждения. При этом понятие «отказ» является одним из главных понятий теории надежности.

Отказ – это потеря способности изделия выполнять требуемую функцию. Отказ является событием, которое приводит изделие к состоянию неисправности.

Неисправность – это состояние изделия, характеризующееся неспособностью выполнять требуемую функцию, исключая такую неспособность во время профилактического обслуживания или других запланированных действий, или из-за нехватки внешних ресурсов.

Повреждение – приемлемая для пользователя неполная способность изделия выполнять требуемые функции.

К повреждениям можно отнести отдельные нарушения в ТС, не приводящие к потере ее работоспособности. Например, повреждение лакокрасочного покрытия на отдельных элементах ТС. Неустранение повреждения может привести ТС к отказу.

Отказы классифицируют по признакам, приведенным в табл. 1.

В зависимости от последствий, вызываемых отказами, их можно подразделить на функциональные и параметрические [11].

1. Классификация отказов

Признак	Вид отказа
Последствия, вызываемые отказом	Функциональный Параметрический
Характер возникновения	Внезапный Постепенный
Источник процессов, приводящих к отказам	Вследствие изнашивания Вследствие старения
Связь с отказом других элементов	Зависимый Независимый
Полнота выполнения требуемых функций	Полный Частичный
Причина возникновения	Конструктивный Производственный Эксплуатационный Систематический

При **функциональном отказе** изделие прекращает выполнять заданные функции. При **параметрическом отказе** изменение выходных характеристик изделия превышает допустимые нормы.

Функциональный отказ ТС – это отказ, в результате которого наступает прекращение ее функционирования, не предусмотренное регламентированными условиями производства или конструкторской документацией. Функциональный отказ наступает в результате разрушения деталей станка, приспособления, инструмента и др. Это приводит к невозможности обеспечить, например, формообразующее движение резания и транспортировку заготовки.

Параметрический отказ ТС – это отказ, при котором сохраняется ее функционирование, но происходит выход значений одного или нескольких параметров технологического процесса за пределы, установленные в нормативно-технической или конструкторской и технологической документации. При эксплуатации ТС подвержена механическим, тепловым и другим воздействиям, способствующим снижению качества обработанных деталей и производительности обработки.

По характеру (закономерности) возникновения и возможности прогнозирования отказы разделяют на внезапные и постепенные.

Внезапный отказ возникает неожиданно и проявляется в скачкообразном изменении одного или нескольких заданных параметров изделия. Момент наступления внезапного отказа является случайным, не зависящим от продолжительности эксплуатации, и его невозможно прогнозировать. Примерами такого отказа для ТС является поломка инструмента вследствие колебания твердости материала заготовки, ошибка наладчика в настройке оборудования и т.д. Отличительной особенностью внезапных отказов является постоянство во времени их интенсивности.

Постепенный отказ проявляется в постепенном изменении одного или нескольких заданных параметров изделия. Причиной постепенных отказов обычно бывает износ, усталостные разрушения и другие постепенно нарастающие изменения в деталях и узлах изделия в процессе эксплуатации. К этому виду относится большинство функциональных отказов ТС, поскольку они связаны с изнашиванием, коррозией, усталостными разрушениями и другими процессами разрушения и деформирования элементов станка, приспособления и режущего инструмента. Время наступления постепенного отказа функционально связано с интенсивностью физико-механических процессов, происходящих при работе ТС. Зная ресурс детали или узла, а также применяя методы технического диагностирования, такой отказ можно предвидеть и предупредить своевременным техническим обслуживанием или ремонтом.

Постепенные отказы в зависимости от источника процессов, приводящих к неисправности, разделяются на отказы вследствие изнашивания и старения.

Отказ вследствие изнашивания – это отказ, вероятность возникновения которого возрастает с течением времени из-за накапливания ухудшений, вызванных прилагаемыми при использовании нагрузками. Примером могут служить функциональные отказы ТС, вызванные износом подшипниковых узлов,

направляющих, зубьев зубчатых колес, шлицевых и шпоночных соединений и др. изнашивание – причина, определяющая срок службы ТС. К параметрическим отказам ТС приводит износ режущего инструмента.

Отказ вследствие старения – это отказ, вероятность возникновения которого увеличивается из-за накапливающихся ухудшений с течением календарного времени. Применительно к ТС примерами этого вида отказов являются старение базовых деталей, сальников, прокладок и т.д.

По связи с отказами других элементов различают зависимые и независимые отказы.

Зависимый отказ – это отказ, вызванный другим отказом или неисправностью.

Независимый отказ – это отказ, не вызванный прямо или косвенно другим отказом или неисправностью.

В большинстве практических случаев параметрические отказы ТС являются следствием ее функциональных отказов. Например, износ или поломка режущего инструмента приводит к отказу ТС по параметрам точности изготовления деталей.

В зависимости от полноты выполнения требуемых функций различают полные и частичные отказы.

Полный отказ – это отказ, характеризующийся потерей способности изделия выполнять все требуемые функции. Так, разрушение подшипника шпинделя приводит к остановке главного движения и к полному отказу ТС.

Частичный отказ – это отказ, характеризующийся потерей способности изделия выполнять некоторые требуемые функции. Частичный отказ является событием, которое приводит к состоянию частичной неисправности. Например, поломка одного из инструментов многооперационного станка с ЧПУ приводит к частичной неисправности и, соответственно, частичному отказу станка – невозможности выполнения технологического перехода именно этим инструментом.

Для обеспечения требуемого уровня надежности ТС и ее элементов необходимо не просто констатировать факт отказа, но и устанавливать истинную причину нарушения работоспособности.

По причине возникновения отказы могут быть отнесены к одной из трех основных групп: конструкционные, производственные и эксплуатационные.

Конструкционный отказ возникает в результате несовершенства или нарушения установленных правил и (или) норм конструирования. Типичными ошибками конструирования являются: недостаточная защищенность узлов трения, наличие концентраторов напряжений, неправильный расчет несущей системы, неправильный выбор материала детали. Так, неправильный расчет на

прочность наиболее нагружаемого сечения детали может привести к ее поломке и, соответственно, к отказу изделия.

Производственный отказ наступает при изготовлении или ремонте изделия из-за нарушения установленного технологического процесса: например, несоблюдение заданных параметров точности при изготовлении детали, входящей в изделие.

Эксплуатационный отказ вызывается несовершенством или нарушением правил и (или) условий эксплуатации. Несвоевременное проведение регулировок, применение несоответствующих требованиям смазочных материалов, использование изделия не по назначению – все это примеры нарушений правил эксплуатации, которые могут привести к отказам. Например, применительно к ТС несвоевременная настройка станка на размер может привести к параметрическому отказу ТС.

Отказ, однозначно вызванный определенной причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, правил эксплуатации и документации, называется **систематическим отказом**.

1.4. Свойства надежности

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации, может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, как в отдельности, так и в определенном сочетании этих свойств.

Безотказность – это способность изделия выполнять требуемую функцию в заданном интервале времени в данных условиях. Обычно предполагают, что в начале интервала времени изделие в состоянии выполнять требуемую функцию. «Данные условия» могут включать климатические, технические и экономические обстоятельства.

Долговечность – это способность изделия выполнять требуемую функцию до достижения предельного состояния при заданных условиях использования и технического обслуживания.

Для неремонтируемых изделий свойства безотказность и долговечность совпадают, так как их предельным состоянием является первый отказ. Ремонтируемое изделие после отказа может быть восстановлено, если это экономически целесообразно. Для некоторых изделий, которые можно многократно ремонтировать, пределом долговечности обычно бывает экономическая целесообразность дальнейшей эксплуатации или моральный износ. ТС также допускают возможность многократного восстановления, но наступает момент, когда их ремонтировать невыгодно, и тогда их списывают.

Различие свойств безотказности и долговечности в том, что безотказность – это способность изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние, а долговечность – это свойство изделия сохранять работоспособное состояние с возможными перерывами для ремонта.

Ремонтоспособность – это способность изделия при данных условиях использования и технического обслуживания к поддержанию или восстановлению состояния, в котором оно может выполнять требуемую функцию. Факторы, влияющие на ремонтпригодность, могут быть объединены в две основные группы: расчетно-конструкторские и эксплуатационные.

К расчетно-конструкторским факторам относятся сложность конструкции, уровень взаимозаменяемости и унификации деталей и эксплуатационных материалов, возможность независимого снятия узлов изделия или деталей и простоты разборки-сборки и др.

Эксплуатационные факторы связаны с возможностями человека-оператора, эксплуатирующего изделие.

Сохраняемость – это способность изделия выполнять требуемую функцию в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Из определения следует, что сохраняемость фактически представляет собой способность изделия сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования.

В процессе хранения или транспортирования изделие не работает. В связи с этим основным видом его отказа на этих стадиях является отказ постепенный, возникающий вследствие старения материала [7]. Время возникновения такого отказа – величина случайная и получить экспериментальным путем ее распределение чрезвычайно трудно. В связи с этим прогнозировать показатели сохраняемости в процессе проектирования и создания изделия вряд ли возможно.

1.5. Количественные показатели надежности

При решении практических задач, связанных с надежностью изделий, в том числе ТС, качественной оценки недостаточно. Количественную оценку отдельных свойств надежности можно выполнить с помощью единичных критериев (рис. 1). Существуют также комплексные критерии, характеризующие одновременно несколько свойств надежности, например, коэффициент готовности.

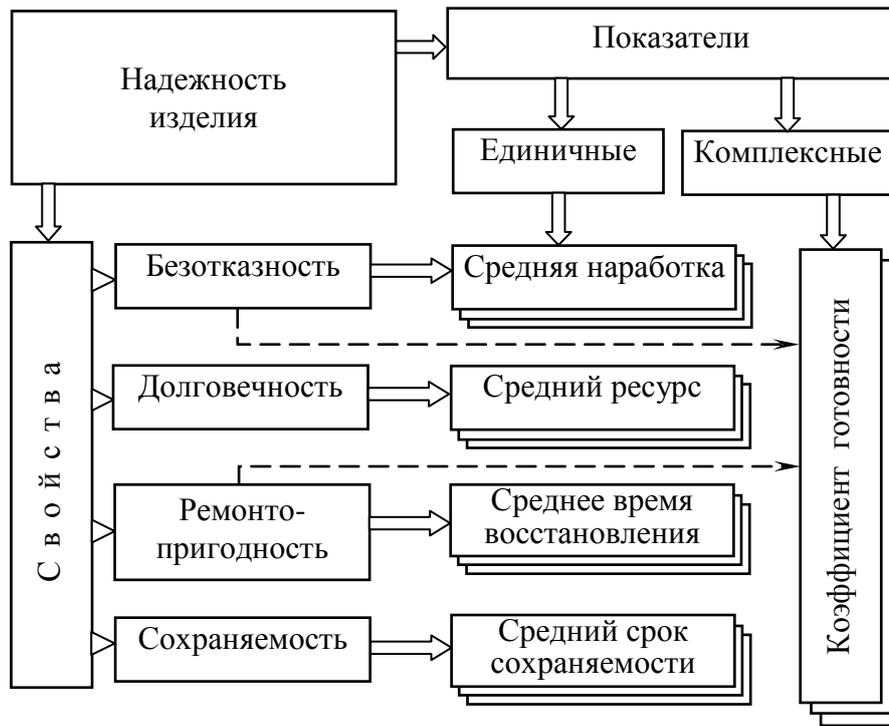


Рис. 1. Свойства и показатели надежности изделия

1.5.1. Показатели безотказности

Одним из основных понятий, используемых при определении количественных показателей надежности, является наработка.

Нарработка – это интервал времени, в течение которого изделие находится в состоянии функционирования. Нарработка может быть непрерывной величиной (например, продолжительность работы в часах) и дискретной величиной (число циклов, срабатываний, запусков, бракованных деталей и т.п.).

При анализе надежности ТС используется наработка до отказа, измеряемая в часах, сутках, месяцах или годах.

Нарработка до отказа – это наработка, накопленная от первого использования изделия или его восстановления.

Частным случаем наработки до отказа является наработка до первого отказа, т.е. наработка, накопленная от первого использования изделия до его отказа. Нарработка до первого отказа возможна как для невосстанавливаемых, так и для восстанавливаемых изделий. Для восстанавливаемых изделий используется также наработка между отказами, т.е. суммарная наработка восстанавливаемого изделия между двумя последовательными отказами.

Так как отказ изделия является случайным событием, а наработка до отказа случайной величиной, то для расчета количественных показателей надежности используют методы теории вероятностей и математической статистики.

Наибольшей информативностью обладает функция распределения наработки до отказа $F(t)$, которая определяет вероятность P того, что время

работы изделия t не превышает некоторого значения t_i , т.е. попадает на временной шкале на участок от $-\infty$ до t_i (рис. 2, а):

$$F(t) = P(t \leq t_i). \quad (1)$$

Функция $F(t)$ называется интегральным законом распределения и является неубывающей функцией своего аргумента, которая для непрерывных процессов монотонно возрастает от нуля при $t_i \rightarrow 0$, ($F(t) = F(0) = 0$) и достигает единицы при $t_i \rightarrow +\infty$, ($F(t) = F(+\infty) = 1$). График функции распределения наработки до отказа в общем виде при наступлении отказа в различные моменты времени от t_{min} до t_{max} показан на рис. 2, б. Для любого значения наработки t_i событие $t \leq t_i$ означает отказ в течение наработки t_i , а вероятность $F(t \leq t_i)$ – вероятность отказа за наработку t_i .

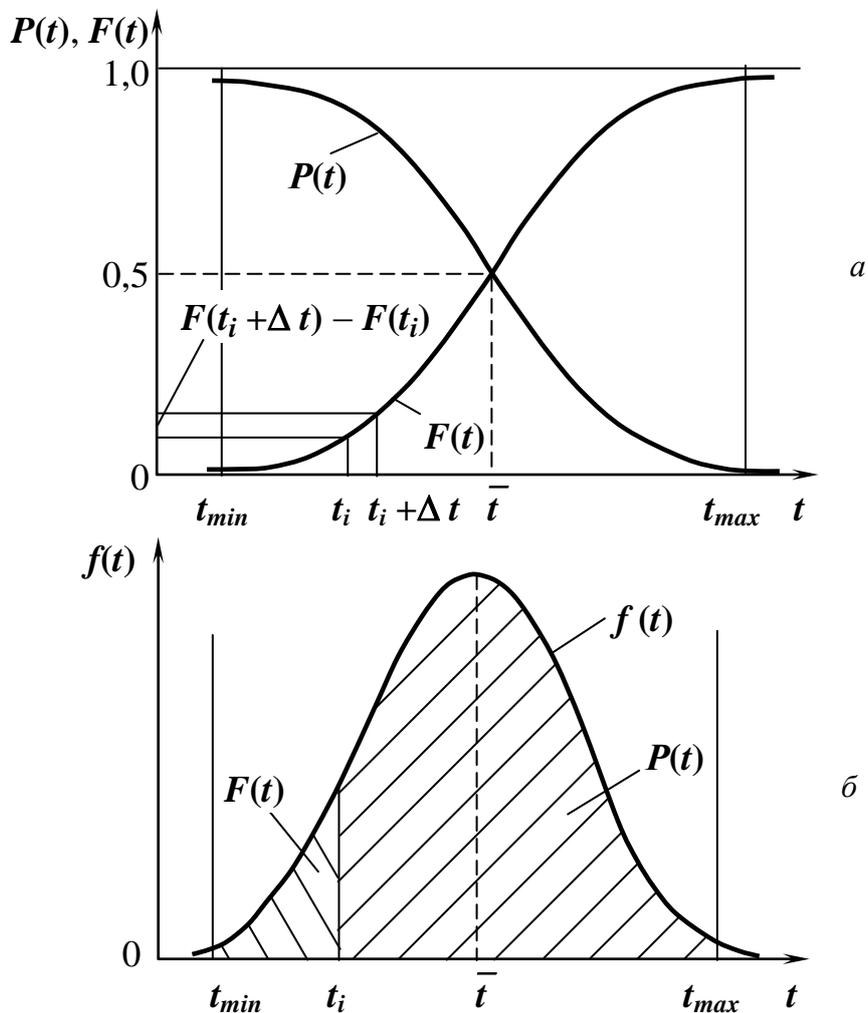


Рис. 2. Интегральная функция (а) и плотность наработки до отказа (б)

Статистически вероятность отказа за наработку t_i определяется отношением числа отказов $n(t_i)$ с наработкой до отказа менее t_i к общему числу наблюдаемых изделий N (общему числу возможных отказов):

$$\hat{F}(t_i)^* = \frac{\hat{n}(t_i)}{N}. \quad (2)$$

Аналогично можно определить вероятность безотказной работы, которая определяется отношением накопленного числа работоспособных к данному моменту наработки t_i изделий $N(t_i)$ к общему числу наблюдаемых изделий:

$$\hat{P}(t) = \frac{N(t_i)}{N} = \frac{N - n(t_i)}{N} = 1 - \hat{F}(t_i). \quad (3)$$

Вероятность отказа и вероятность безотказной работы – это события противоположные и несовместимые, т.к. они не могут появляться одновременно в данном изделии:

$$P(t) + F(t_i) = 1. \quad (4)$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ изменяется от нуля до единицы (см. рис. 2, а). Чем ближе к единице, тем выше безотказность работы изделия. Точка пересечения кривых $F(t)$ и $P(t)$ определяет среднюю наработку до отказа. В этой точке $F(t) = P(t) = 0,5$.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ является одним из основных показателей безотказности ТС [11, 19] и сравнительно просто вычисляется теоретически и определяется по статистическим данным об отказах ТС. К недостаткам этого критерия следует отнести ограниченность применения: вероятность безотказной работы характеризует надежность только невосстанавливаемой техники или восстанавливаемой до первого ее отказа.

По ГОСТ Р 27.002 *вероятность безотказной работы* $P(t_1, t_2)$ – это вероятность выполнения требуемой функции при данных условиях в интервале (t_1, t_2) . Обычно предполагают, что в начальный интервал времени изделие находится в работоспособном состоянии. При $t_1 = 0$ t_2 принимают равным t и вероятность безотказной работы обозначают как $P(t)$.

Вероятность безотказной $P(t)$ может быть определена через плотность наработки до отказа.

Определим вероятность $P(t)$ попадания наработки до отказа на участок от t_i до $t_i + \Delta t$:

* Показатели надежности, подсчитанные по результатам наблюдений над конкретной партией изделий (выборки), обозначены значком \wedge , а полученные теоретическим путем, когда

$$P(t_i \leq t \leq t_i + \Delta t) = F(t_i + \Delta t) - F(t_i). \quad (5)$$

Тогда предел отношения при $\Delta t \rightarrow 0$ позволяет получить производную от функции распределения

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t_i + \Delta t) - F(t_i)}{\Delta t} = F'(t_i). \quad (6)$$

Функцию $F'(t_i)$ обозначают $f(t)$. Она характеризует плотность распределения наработки до отказа. Кривая $f(t)$ может быть как возрастающей, так и убывающей. Для большинства практических законов распределения кривая плотности распределения обычно имеет один максимум, как изображено на рис. 2, б.

Приняв $\Delta t \rightarrow dt$, получим дифференциальный закон распределения наработки до отказа

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (7)$$

Проинтегрировав выражение (7), получим

$$F(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt. \quad (8)$$

Так как $P(t) = 1 - F(t)$, то вероятность безотказной работы

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t) \cdot dt. \quad (9)$$

Площадь под кривой $f(t)$ на участке от 0 до t_i (см. рис. 2, б) определяет вероятность отказа $F(t)$, а площадь на участке от t_i до ∞ – вероятность безотказной работы $P(t)$. С увеличением наработки вероятность безотказной работы уменьшается, так как уменьшается число работоспособных изделий.

При известном законе распределения наработки до отказа $f(t)$ можно определить периодичность технического обслуживания ТС по допустимому уровню вероятности безотказной работы $P(t)$. В этом случае, как правило, допустимый уровень безотказности принимают $P(t) = 0,85 \dots 0,95$.

Статистически $f(t)$ определяется отношением числа отказавших изделий в единицу времени к числу испытываемых изделий при условии, что отказавшие изделия не восполняются исправными

$$\hat{f}(t) = \frac{n(t_i, t_i + \Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (10)$$

где $n(t_i, t_i + \Delta t)$ – число отказавших изделий за промежуток времени $[t_i, t_i + \Delta t]$.

Поскольку $n(t_i, t_i + \Delta t) = N(t_i) - N(t_i + \Delta t)$, то

$$\hat{f}(t) = \frac{N(t_i) - N(t_i + \Delta t)}{N \cdot \Delta t}. \quad (11)$$

По известному закону распределения можно определить *среднюю наработку до отказа* (математическое ожидание наработки до отказа)

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt \quad (12)$$

или

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} P(t) \cdot dt. \quad (13)$$

Таким образом, средняя наработка до отказа есть площадь под кривой вероятности безотказной работы (рис. 3).

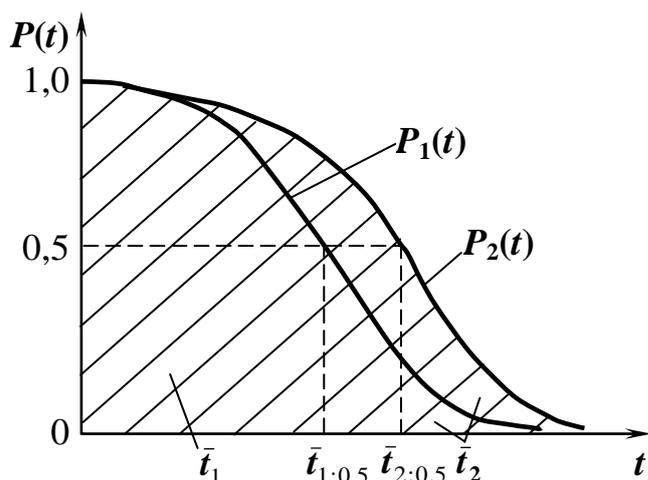


Рис. 3. Интегральная функция наработки до отказа

Каждому изделию в зависимости от его надежности соответствует своя кривая $P(t)$. Более надежным является изделие с вероятностью безотказной работы $P_2(t)$ ($P_2(t) > P_1(t)$). Соответственно, средняя наработка до отказа второго изделия больше, чем первого $\bar{t}_2 > \bar{t}_1$.

Статистически среднюю наработку до отказа можно определить по формуле

$$\hat{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (14)$$

где t_i – наработка до отказа i -го изделия.

Для анализа причин отказов важным является знание интенсивности отказов ТС.

Мгновенная интенсивность отказов $\lambda(t)$ определяется как условная плотность вероятности возникновения отказов невосстанавливаемого изделия, которая находится для рассматриваемого момента времени при условии, что отказ до этого времени не возник:

$$\lambda(t) = \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)}. \quad (15)$$

Среднюю интенсивность отказов вычисляют по формуле

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) \cdot dt, \quad (16)$$

где t_1, t_2 – интервал времени (наработки) от t_1 до t_2 .

Статистически интенсивность отказов определяется как отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, непрерывно работающих в интервале $[t_i, t_i + \Delta t]$:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t_i, t_i + \Delta t)}{\bar{N} \cdot \Delta t}, \quad (17)$$

где $\bar{N} = [N(t_i) + N(t_i + \Delta t)]/2$ – среднее число исправно работающих изделий в интервале $[t_i, t_i + \Delta t]$.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ наряду с вероятностью безотказной работы $P(t)$ является основным показателем надежности элементов сложных систем, к каковым относятся ТС. Это объясняется следующими обстоятельствами [7]:

- по известной интенсивности отказов наиболее просто оценить остальные показатели надежности как сложных систем, так и их элементов;
- интенсивность отказов нетрудно получить экспериментально;
- функция $\lambda(t)$ обладает хорошей наглядностью.

Зависимость интенсивности отказов от времени, как правило, имеет три периода (участка), каждый из которых отражает особенности отказов, изменяющихся с течением времени работы ТС (рис. 4).

Участок Δt_1 – это период приработки. Приработочные отказы вызваны наличием скрытых дефектов, приобретенных при изготовлении изделий, контактными деформациями сопрягаемых поверхностей и др. Этому периоду свойственны функциональные отказы ТС.

Участок Δt_2 – это основной временной участок работы ТС – период нормальной эксплуатации. В этот период постепенные отказы еще не наступили, интенсивность отказов стабильна и они носят преимущественно внезапный (случайный) характер. Внезапные отказы ТС могут быть как

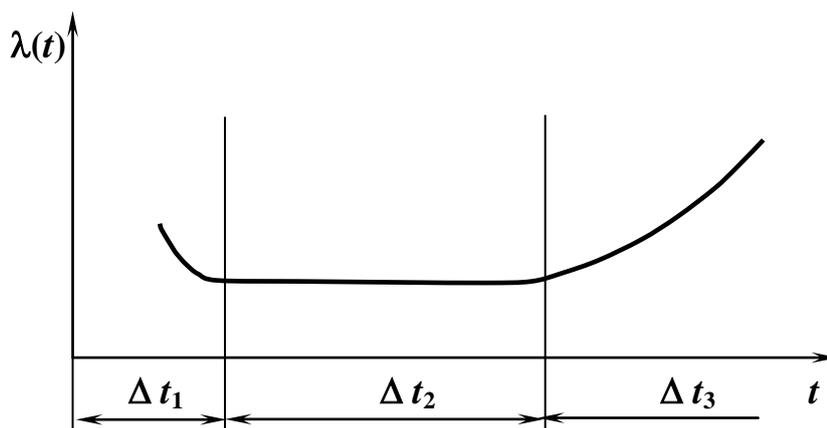


Рис. 4. Зависимость интенсивности отказов от времени

функциональными, так и параметрическими. Они вызваны неблагоприятным течением многих обстоятельств, количество их сравнительно невелико и они имеют постоянную интенсивность $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$.

Участок Δt_3 – это период износа. Этот период характеризуется возникновением постепенных отказов и повышением их интенсивности – $\lambda(t) \neq \text{const}$. В этот период происходят параметрические отказы, вызванные старением и износом элементов ТС. Не исключено, конечно, появление на этом участке и внезапных отказов. Нарботка к моменту выхода на этот участок определяет общую долговечность.

Значения интенсивности отказов деталей и соединений механизмов ТС приведены в табл. 2.

2. Значения интенсивности отказов механических элементов [2]

Наименование элемента	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч	
	предельные значения	среднее значение
Зубчатые передачи	0,11 – 0,36	0,23
Подшипники качения:		
шариковые	0,02 – 1,0	0,51
роликовые	0,02 – 2,22	1,12
Подшипники скольжения	0,008 – 0,42	0,21
Уплотнения элементов:		
вращающиеся	0,25 – 1,12	0,68
поступательнодвигающиеся	0,11 – 0,92	0,50
Валы	0,15 – 0,62	0,38

Рассмотренные показатели безотказности используются для оценки надежности восстанавливаемых изделий на отдельных этапах их работы: до первого отказа и между отказами. Для рациональной организации технического

обслуживания и ремонта ТС необходимо оценивать динамику отказов в каждом ремонтируемом изделии в течение всего жизненного цикла от начала эксплуатации до списания.

На рис. 5, а показан временной график работы изделия. Периоды времени «Р» работы изделия будут чередоваться с периодами «В» восстановления (ремонта) и «ТО» технического обслуживания. Чем длиннее периоды «Р» и чем короче «В» и «ТО», а также, чем их меньше, тем изделие надежнее. Если на временной шкале выделить только участки «Р», то получим график потока отказов (рис. 5, б). Математически интенсивность изменения потока отказов изделия оценивается параметром потока отказов. Для практических расчетов используются понятия «интенсивный параметр потока отказов» и «средний параметр потока отказов».

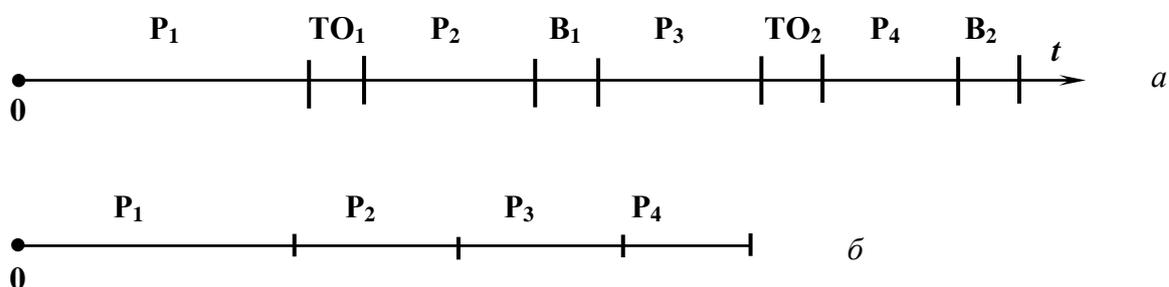


Рис. 5. Графики работы изделия (а) и потока отказов (б)

Мгновенный параметр потока отказов $z(t)$ – это предел (если он существует) отношения среднего числа отказов ремонтируемого изделия в интервале времени $(t + \Delta t)$ к длине этого интервала Δt , стремящейся к нулю

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m(t + \Delta t) - m(t))}{\Delta t} \quad (18)$$

или

$$z(t) = \frac{dm(t)}{dt}, \quad (19)$$

где N – количество наблюдаемых изделий; $m(t + \Delta t)$ – число отказов каждого изделия за период наработки от 0 до $(t + \Delta t)$; $m(t)$ – число отказов каждого изделия за период наработки от 0 до t .

Средний параметр потока отказов связан с мгновенным параметром потока отказов следующим образом

$$z(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} z(t) \cdot dt, \quad (20)$$

где t_1 и t_2 – интервалы времени от t_1 до t_2 .

Параметр потока отказов ТС измеряется в (1/месяц).

Параметр потока отказов изделия равен сумме параметров потока отказов составляющих его элементов (узлов, деталей):

$$z(t) = z_1(t) + z_2(t) + \dots + z_k(t), \quad (21)$$

где $z_1(t) - z_k(t)$ – параметры потока отказов элементов, составляющих изделие.

Величина, обратная параметру потока отказов, является наработкой на отказ изделия t_0 . Нарботка на отказ показывает, какие наработки в среднем приходится на один отказ в изделии.

Для относительно небольшого времени функционирования изделия параметр потока отказов близок к плотности распределения наработки до отказа (рис. 6). При длительной работе изделия плотность распределения стремится к нулю, тогда как параметр потока отказов приближается к своему стационарному значению, равному $1/t_0$ [7].

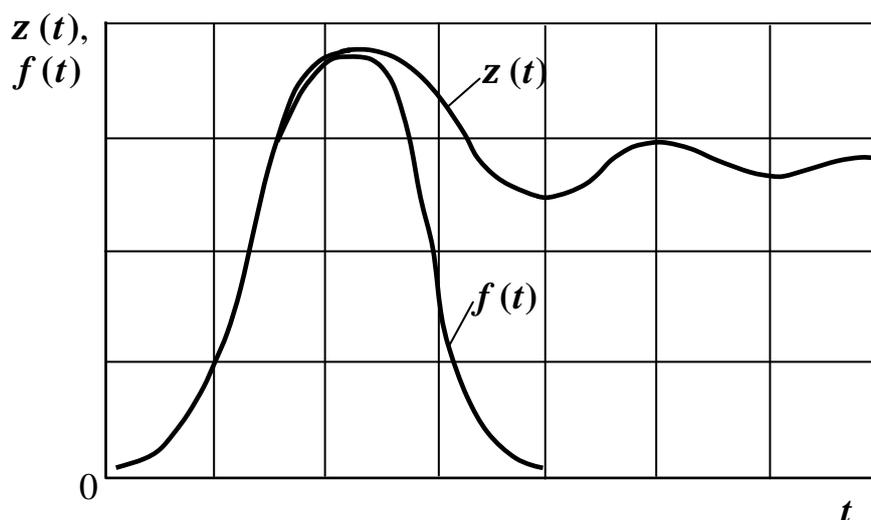


Рис. 6. График плотности распределения $f(t)$ и параметра потока отказов $z(t)$

1.5.2. Показатели долговечности

Показатели долговечности изделия делятся на две группы:

- показатели, связанные с календарным временем службы изделия – сроки службы;
- показатели, связанные с наработкой изделия – ресурсы.

Срок службы – это продолжительность эксплуатации изделия или ее возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния. Сроком службы оценивают полную продолжительность существования изделия (часы, месяцы, годы) независимо от того, работает ли оно или

простаивает в связи с ремонтом, техническим обслуживанием или по другим причинам (например, по организационным причинам).

Ресурс – это суммарная наработка изделия в течение срока службы. Ресурсом оценивают фактическую наработку (например, в часах), без учета перерывов в работе по любым причинам.

Согласно ГОСТ 27.003 ресурс в качестве показателя долговечности используется для изделий, в которых основным процессом, определяющим переход в предельное состояние, является изнашивание (например, вкладыши подшипника скольжения).

Если основным процессом, определяющим переход в предельное состояние, является старение (например, старение сальников), то в качестве показателя долговечности используется срок службы.

Различают ресурс: средний, гамма-процентный, остаточный и др. В технической документации может быть указан ресурс до капитального ремонта, между капитальными ремонтами, до списания (полный ресурс).

Средний ресурс, например, до капитального ремонта оценивается средним арифметическим

$$\bar{t}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}, \quad (22)$$

где t_{pi} – ресурс i -го изделия до капитального ремонта; N – число наблюдаемых изделий.

Гамма-процентный ресурс t_γ – это ресурс, в течение которого изделие не достигает предельного состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах:

$$P(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} f(t) \cdot dt = \frac{\gamma}{100}. \quad (23)$$

Предельным состоянием для невосстанавливаемых изделий является первый отказ, а для восстанавливаемых – необходимость капитального ремонта, списания или снятие с эксплуатации по другим причинам.

Гамма-процентный ресурс t_γ можно представить графически. Для этого необходимо через точку $P(t_\gamma) \cdot 100 = \gamma$ на оси ординат графика безотказной работы (рис. 7) провести горизонтальную линию до пересечения с кривой. Абсцисса точки

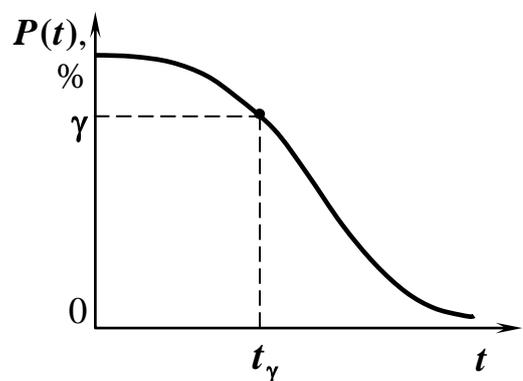


Рис. 7. Вероятность безотказной работы изделия

пересечения является гамма-процентным ресурсом t_γ . Например, $\gamma = 90\%$ означает, что к моменту наработки $t_\gamma = t_{90}$ осталось работоспособных, т.е. не имеющих отказа или не требующих капитального ремонта, 90% изделий.

1.5.3. Показатели сохраняемости

Сохраняемость оценивают показателями, аналогичными тем, которые применяются для оценки долговечности, например, *средний срок сохраняемости* или *гамма-процентный срок сохраняемости*.

В процессе хранения и транспортирования техника не работает. В связи с этим основным видом ее отказа является отказ постепенный, возникающий вследствие старения материала. Время возникновения такого отказа – величина случайная и получить экспериментальным путем ее распределение чрезвычайно трудно [7]. Поэтому прогнозировать показатели сохраняемости в процессе проектирования и оценивать при хранении сложно.

1.5.4. Показатели ремонтпригодности

Повысить надежность изделия в процессе эксплуатации нельзя. Ее можно только обеспечить и поддерживать на необходимом уровне. Для этого проводится техническое обслуживание, диагностика, восстановление или ремонт. Целью этих мероприятий является продление периода нормальной эксплуатации изделия, когда интенсивность отказов является величиной постоянной. Эффективность мероприятий по обеспечению и поддержанию необходимого уровня надежности оценивается ремонтпригодностью.

Ремонтпригодность характеризуют затратами времени на обнаружение повреждений и восстановление изделия или его элементов после отказа и поддержание его в работоспособном состоянии путем регулярного технического обслуживания. Одним из показателей ремонтпригодности является среднее время восстановления.

Среднее время восстановления $\bar{t}_в$ определяется отношением среднего суммарного времени восстановления к среднему числу восстановлений при длительной работе изделия.

Если на отыскание причин отказов и их устранение затрачено время t_1, t_2, \dots, t_n , то среднее время восстановления

$$\bar{t}_в = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (24)$$

где n – число отказов.

Фактически среднее время восстановления характеризует среднюю продолжительность вынужденного простоя изделия, необходимого для идентификации и устранения неисправности, приведшей к отказу.

Восстановление работоспособного состояния изделия осуществляется посредством ремонта, т.е. корректирующего технического обслуживания, включающего непосредственные действия, выполняемые на изделии. При определении среднего времени восстановления учитывают только нормативную (технологическую) продолжительность ремонта и не учитывают простои изделия по организационным причинам, например, для ТС простои из-за отсутствия заготовок, инструмента и др.

1.5.5. Комплексные показатели надежности

Выше были рассмотрены единичные показатели, позволяющие оценить лишь одно из свойств надежности. Однако, при недостаточной безотказности, но высокой ремонтпригодности восстанавливаемое изделие может иметь достаточный уровень надежности. Поэтому для сложных восстанавливаемых систем, к каковым относится ТС, для оценки надежности используются комплексные показатели, позволяющие одновременно оценить несколько важнейших свойств изделия.

Наиболее часто на практике используются комплексные показатели надежности, к которым относятся коэффициенты готовности (мгновенный, средний и стационарный), оперативной готовности и технического использования.

Мгновенный коэффициент готовности $A(t)$ – это вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии.

Средний коэффициент готовности $\bar{A}(t_1, t_2)$ – это среднее значение мгновенного коэффициента готовности в интервале времени от t_1 до t_2

$$\bar{A}(t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) \cdot dt. \quad (25)$$

Стационарный коэффициент готовности A – предел (если он существует) мгновенной готовности, когда время стремится к бесконечности.

На практике стационарный коэффициент готовности может быть определен по формуле

$$A = \frac{\bar{t}}{\bar{t} + \bar{t}_B}, \quad (26)$$

где \bar{t} – средняя наработка на отказ (средняя продолжительность работоспособного состояния), час; \bar{t}_B – среднее время восстановления (средняя продолжительность неработоспособного состояния по внутренней причине), час.

Время на ремонт изделия может быть сокращено за счет проведения планового технического обслуживания. Это учитывается *коэффициентом технического использования*, который представляет собой отношение времени нахождения изделия в работоспособном состоянии к общей продолжительности эксплуатации в заданном интервале времени, включая все виды технического обслуживания

$$A_{\text{ти}} = \frac{\bar{t}}{\bar{t} + \bar{t}_{\text{в}} + \bar{t}_{\text{то}}}, \quad (27)$$

где $\bar{t}_{\text{то}}$ – средняя продолжительность технического обслуживания.

Зная стационарный коэффициент готовности и вероятность безотказной работы, можно определить коэффициент оперативной готовности, т.е. вероятность выполнения задания в конкретный момент времени.

Коэффициент оперативной готовности – это вероятность того, что изделие в данный момент времени t_1 находится в работоспособном состоянии и, начиная с этого момента, выполнит требуемую функцию при данных условиях в интервале от t_1 до t_2 . Коэффициент оперативной готовности при практических расчетах можно определить как произведение коэффициента готовности и вероятности безотказной работы

$$A_0 = A \cdot P(t_1, t_2). \quad (28)$$

1.6. Схема формирования параметрического отказа

При механической обработке под воздействием температурно-силового фактора и внешних воздействий могут появляться и развиваться во времени процессы деформации, износа, разрушения элементов ТС (деталей станка и приспособления или инструмента), приводящие к ее повреждению. Параметрический отказ возникает в том случае [11], если повреждения приведут к изменениям какого-либо выходного параметра (например, точности размера, отклонений формы, расположения или шероховатости поверхностей изготавливаемой детали), а значение этого параметра выйдет за установленные пределы (за пределы поля допуска).

На рис. 8 показана принципиальная схема изменения во времени t выходного параметра x и формирования основного закона надежности – плотности распределения наработки до отказа $f(t)$. Отказ наступает при достижении выходного параметра x своего предельного значения x_{max} . Это событие происходит через некоторый случайный промежуток времени $t_i = T$ после начала

эксплуатации или восстановления ТС. Так как повреждения ТС возникают и изменяются случайно, то изменение выходного параметра x во времени будет носить случайный характер и пойдет по одной из реализаций* случайной функции $x(t)$ с математическим ожиданием $m_x(t)$. Начало координат функции $x(t)$ смещено в точку a_0 по оси ординат, что связано с начальными повреждениями в элементах ТС. При $t = 0$ смещение может иметь разброс с распределением $f(a)$. Это обусловлено возникновением и протеканием таких процессов, как деформации, вибрации и др., которые проявляются сразу же в начале функционирования ТС [9] и носят случайный характер. Следовательно, исходный резерв надежности ТС по выходному параметру x сокращается и становится равным $x_{max} - a_0$.

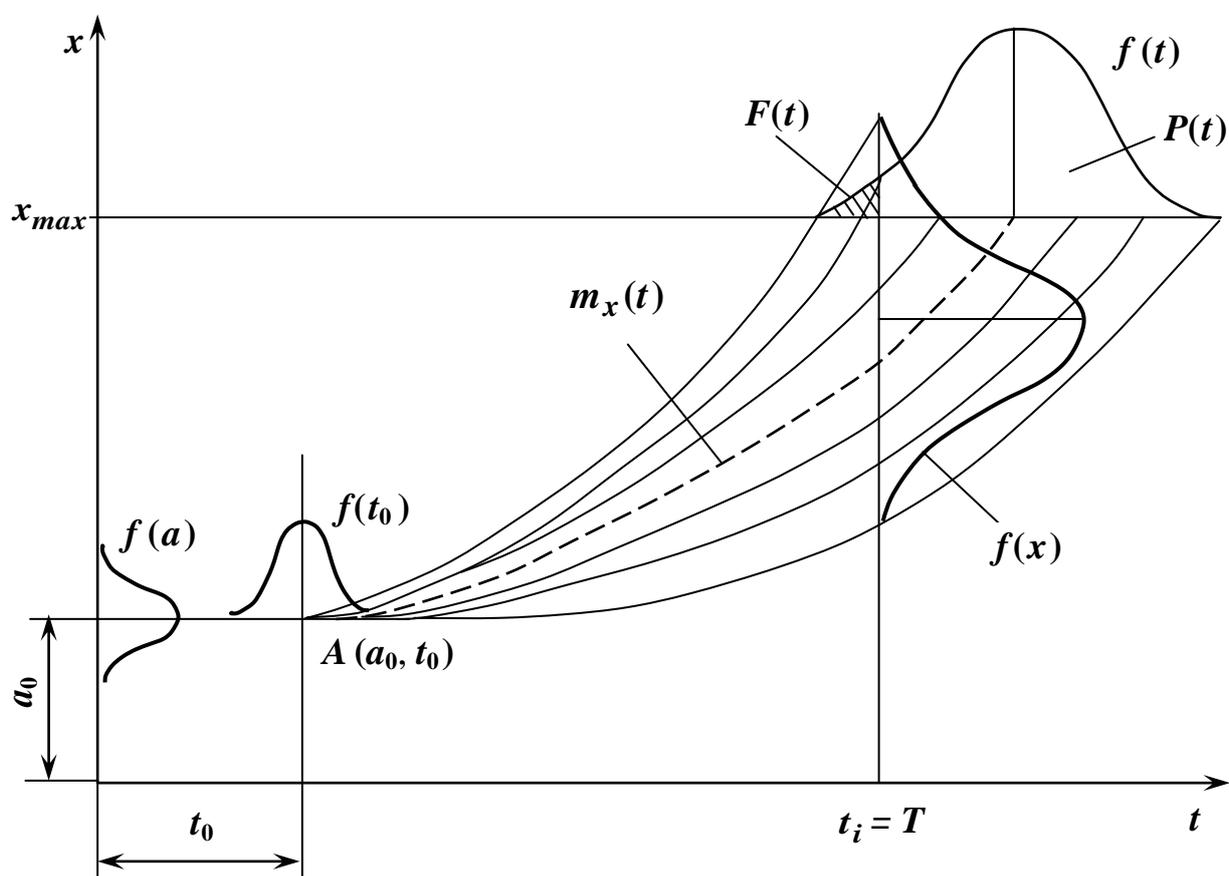


Рис. 8. Схема формирования параметрического отказа [10]

* Функция исследуемого параметра в зависимости от времени, полученная в результате одной серии опытов, носит название реализации случайной функции.

В ряде случаев процесс изменения выходного параметра x может начаться через некоторый промежуток времени t_0 , который является случайной величиной с плотностью распределения $f(t_0)$ и связан с накоплением повреждений, например, если повреждения носят усталостный характер [11].

В каждый момент времени t_i выходной параметр характеризуется некоторым законом распределения плотности вероятности $f(x)$, который отображает точность ТП; например, рассеивание размеров обработанных деталей (погрешностей обработки).

Выход реализаций $x(t)$ на уровень x_{max} определяет величину наработки до отказа, которая имеет случайный характер с плотностью распределения $f(t)$. Зная закон распределения наработки до отказа $f(t)$, можно рассчитать вероятность безотказной работы $P(t)$, либо вероятность отказа $F(t)$.

1.7. Законы распределения наработки до отказа

В теории вероятностей известно большое число законов распределения случайных величин. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся законы, используемые при анализе эксплуатационной надежности ТС.

Внезапные отказы распределяются обычно по экспоненциальному закону [2, 18]. При этом законе распределения вероятность безотказной работы $P(t)$ может быть определена по формуле:

$$P(t) = \exp \left[\int_0^t \lambda(t) \cdot dt \right]. \quad (29)$$

Внезапные отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность, которая не зависит от наработки изделия, т.е. $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. В этом случае

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{и} \quad F(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (30)$$

Плотность распределения наработки до отказа

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1 - e^{-\lambda t})}{dt}. \quad (31)$$

При экспоненциальном законе распределения средняя наработка до отказа

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} P(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \cdot dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (32)$$

Пример 1. Плотность распределения наработки до отказа измерительной системы активного контроля линейных размеров заготовки на операции шлифования подчиняется экспоненциальному закону с интенсивностью отказов $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ отказ/ч.

Необходимо определить вероятность безотказной работы $P(t)$ за наработку $t = 100$ часов и среднюю наработку до отказа \bar{t} измерительной системы.

1. Вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-0,0005 \cdot 100} = e^{-0,05} = 0,9512 \approx 0,95,$$

т.е. за наработку 100 ч можно ожидать, что откажут пять измерительных систем из 100.

2. Средняя наработка до отказа составляет

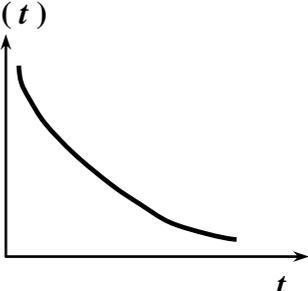
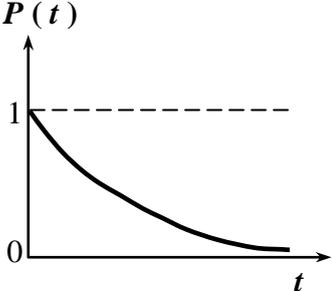
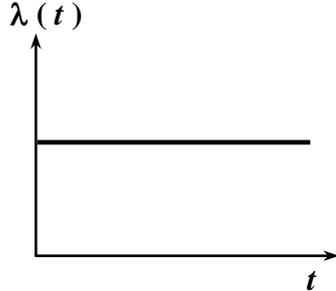
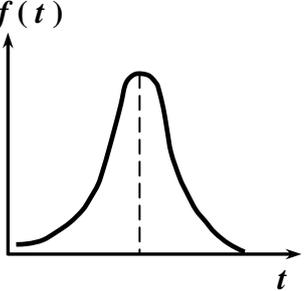
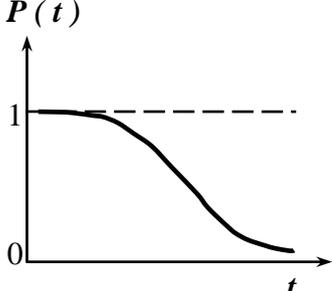
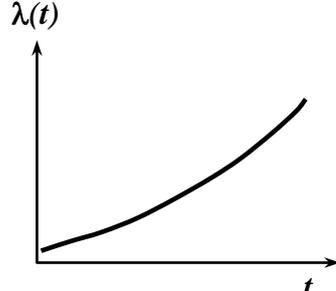
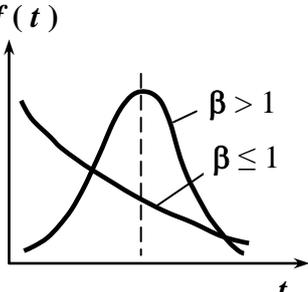
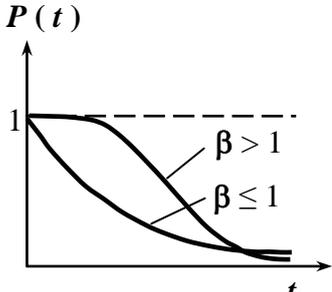
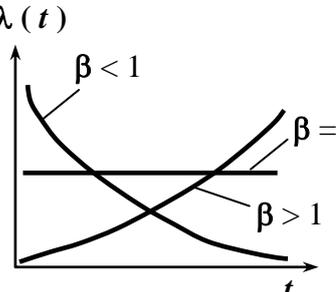
$$\bar{t} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,0005} = 2000 \text{ ч.}$$

Экспоненциальным законом распределения можно аппроксимировать вероятность безотказной работы ТС после окончания приработки. Например, наработка до отказа элементов электронных систем ТС, внезапная поломка зубчатой передачи при действии максимальной пиковой нагрузке на наиболее ослабленный зуб и др.

Для оценки характеристик постепенных отказов нужны законы распределения наработки до отказа, которые дают сначала низкую плотность распределения, затем максимум и далее – снижение плотности, связанное с уменьшением числа работоспособных изделий. В связи с многообразием причин и условий возникновения отказов в этот период для описания надежности применяют несколько законов распределения, которые устанавливают путем аппроксимации результатов испытаний или наблюдений (табл. 3).

Наиболее универсальным, удобным и широко применяемым для практических расчетов показателей надежности является нормальный закон распределения. Нормальное распределение часто используют для приближенных расчетов в тех случаях, когда имеет место биномиальное распределение или распределение Пуассона. Функциональные отказы ТС, которые происходят от одновременного действия многих случайных факторов (динамические нагрузки, износ, усталость материала, коррозия и т.д.) описываются по закону, близкому к нормальному. Этому закону подчиняется, например, распределение погрешностей линейных и угловых размеров, параметров шероховатости поверхностей, возникающих при механической обработке деталей в автоматизированном производстве.

3. Принципиальные зависимости показателей надежности от наработки [7, 9, 18]

Показатель Закон распределения	Плотность распределения наработки до отказа $f(t)$	Вероятность безотказной работы $P(t)$	Интенсивность отказов $\lambda(t)$
Экспоненциальный			
Нормальный			
Вейбулла			

Аналитически нормальный закон распределения (распределения Гаусса) описывается формулой

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (33)$$

где m_t и σ – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение времени безотказной работы изделия. Можно принять $m_t \approx t$, т.е. вместо математического ожидания использовать среднюю наработку до отказа.

На практике пользуются нормированным нормальным распределением, получаемым при введении новой переменной $z = (t - m_t)/\sigma$. Определенный

интеграл с переменным верхним пределом этого распределения называют *функцией Лапласа* или интегралом вероятностей

$$\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-0,5z^2} dz. \quad (34)$$

Для нее справедливы следующие равенства:

$$\Phi_0(0) = 0; \quad \Phi_0(-z) = -\Phi_0(z);$$

$$\Phi_0(-\infty) = -0,5; \quad \Phi_0(+\infty) = 0,5.$$

Значения функции Лапласа $\Phi_0(z)$ приведены в приложении 1. Используя эти значения, можно определить вероятность того, что случайная величина x находится в пределах интервала $m \pm z\sigma$. Если принять $z = 3$, то при нормальном распределении трехсигмовые границы охватывают 99,73 % всех результатов измерений. Отсюда следует правило «трех сигм», согласно которому практически все возможные значения нормально распределенной случайной величины расположены в интервале $m \pm 3\sigma$.

Вероятность безотказной работы для нормального закона распределения определяют по формуле:

$$P(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma^2}} dt = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{t-m_t}{\sigma}\right). \quad (35)$$

По полученному значению вероятности безотказной работы оценивают достаточна ли надежность ТС [10].

Пример 2. Нарботка до отказа ТС подчиняется нормальному закону распределения с параметрами $m_t = 100$ ч и $\sigma = 20$ ч.

Необходимо найти вероятность того, что ТС проработает безотказно в течение 80 часов.

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{t-m_t}{\sigma}\right) = 0,5 - \Phi_0\left(\frac{80-100}{20}\right) = 0,5 - \Phi_0(-1) = 0,5 + \Phi_0(1).$$

По табл. П 1.1 (прил. 1) находим $\Phi_0(1) = 0,341$.

Тогда $P(t) = 0,5 + 0,341 = 0,841$.

Наряду с задачами оценки вероятности безотказной работы за данную наработку, встречаются обратные задачи определения наработки, соответствующей заданной вероятности безотказной работы $P(t) = \gamma$. Значение наработки

определяют с помощью квантилей нормального распределения, принимая $t = t_\gamma$ и $z = u_p$

$$t_\gamma = m_t + u_p \cdot \sigma, \quad (36)$$

где u_p – квантиль, т.е. наработка, при которой будет иметь место заданная вероятность отказа.

Пример 3. Для условий примера 2 определить наработку до отказа ТС, при которой отказы составляют не более 20 %, т.е. $F(t) = 0,2$ и $P(t) = 1 - F(t) = 0,8$.

Для вероятности безотказной работы $P(t) = \gamma = 0,8$ находим квантиль $u_p = -0,842$ (см. табл. П 1.1, прил. 1).

Тогда наработка до отказа

$$t_\sigma = m_t + u_p \cdot \sigma = 100 - 0,842 \cdot 20 = 83,2 \text{ ч.}$$

Пример 3 проиллюстрирован рис. 9.

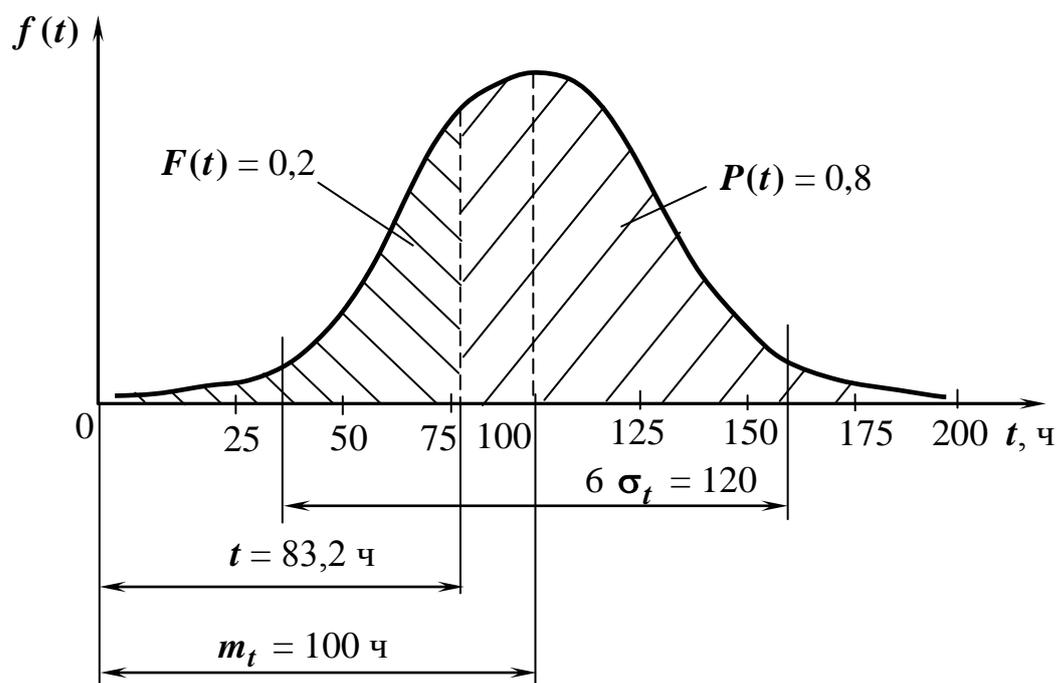


Рис. 9. Плотность распределения наработки до отказа ТС по примерам 2 и 3

Подобные задачи решаются в тех случаях, когда исходя из организационно-технических соображений, принимают регламентированную наработку t_γ , например, до смены инструмента или до подналадки ТС [6].

В практике эксплуатации ТС часто для оценки отказов используют закон Вейбулла [11]. Закон Вейбулла является достаточно универсальным, так как с его помощью можно приблизиться к моделированию процессов возникновения

как внезапных, так и постепенных отказов, вызванных износом или усталостным разрушением деталей.

Распределение Вейбулла характеризуется плотностью распределения наработки до отказа

$$f(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} e^{-(t/\alpha)^\beta}, \quad (37)$$

где β – параметр формы (характеризует форму кривой); α – параметр масштаба.

Универсальность распределения объясняется тем фактором, что при $\beta = 1,0$ распределение превращается в экспоненциальное. Тогда $\alpha = \bar{t}$. При $\beta = 2,5 - 3,5$ распределение Вейбулла близко к нормальному (см. табл. 3).

Вероятность безотказной работы для этого распределения:

$$P(t) = e^{-(t/\alpha)^\beta}. \quad (38)$$

Средняя наработка до отказа \bar{t} и интенсивность отказов $\lambda(t)$ в случае распределения Вейбулла имеют вид:

$$\bar{t} = \alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad \text{и} \quad (39)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}, \quad (40)$$

где $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ – гамма-функция.

Пример 4. Путем обработки данных об отказах ТС установлено, что распределение отказов механизма смены инструментов подчиняется закону Вейбулла с параметрами $\alpha = 1000$ ч и $\beta = 2$. Найти вероятность безотказной работы $P(t)$ и среднюю наработку до отказа при наработке $t = 400$ ч.

1. Вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-(t/\alpha)^\beta} = e^{-(400/1000)^2} = e^{-(0,4)^2} = 0,852.$$

2. Средняя наработка до отказа составит:

$$\bar{t} = \alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 1000 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right) = 1000 \cdot \Gamma(1,5).$$

По табл. П 1.2 (прил. 1) находим $\Gamma(1,5) = 0,886$.

Тогда $\bar{t} = 1000 \cdot 0,886 = 886$ ч.

Рассмотренные выше законы распределения параметрических отказов ТС позволяют оценить изменение выходных параметров ТП во времени,

то есть определить их надежность. Однако основным источником информации для этих законов служат статистические данные о надежности ранее разработанных и находящихся в эксплуатации ТС, т.е. данные, полученные на основании уже свершившихся событий.

Для разработки новых технологий и прогнозирования состояния будущих ТП важным является анализ причин отказов, что невозможно без привлечения физической теории надежности.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения понятий «Технологический процесс» и «Технологическая система».
2. Назовите (уровни) ТС.
3. Дайте определение надежности ТП.
4. Назовите цель оценки надежности ТП.
5. Приведите примеры восстанавливаемого и невосстанавливаемого изделия.
6. Дайте определения основным состояниям изделия.
7. Что называется резервированием в теории надежности?
8. Дайте определения понятий «отказ», «неисправность», «повреждение».
9. Дайте определение функционального и параметрического отказа.
10. Приведите классификацию отказов по характеру (закономерности) возникновения и в зависимости от источника процессов, приводящих к неисправности.
11. Приведите классификацию отказов по причине возникновения.
12. Дайте определения основных свойств надежности.
13. Что понимают под наработкой изделия и какие виды наработки Вы знаете?
14. Назовите основные показатели безотказности.
15. Приведите статистическую оценку вероятности безотказной работы.
16. Приведите график изменения интенсивности отказов от времени.
17. Приведите статистическую оценку средней наработки до отказа, средней интенсивности отказа.
18. Приведите статистическую оценку показателей безотказности восстанавливаемых изделий.
19. Перечислите и дайте определения основным показателям долговечности.
20. Покажите на графике безотказной работы изделия гамма-процентный ресурс.
21. Какие комплексные показатели надежности Вы знаете?
22. Какие законы распределения наработки до отказа в периоды внезапных и постепенных отказов Вы знаете?
23. Приведите принципиальные (типовые) зависимости показателей надежности от наработки.
24. Назовите показатели ремонтпригодности.

2. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Причины потери работоспособности технологической системы

Потеря работоспособности ТС происходит вследствие возникновения параметрических или функциональных отказов. Как правило, параметрические отказы ТС возникают при чистовой обработке заготовок, функциональные – при черновой обработке.

Одним из основных факторов возникновения параметрических отказов ТС являются повреждения инструмента, связанные с его износом, пластической деформацией или разрушением. Повреждения инструмента под воздействием теплового, силового и других факторов влияют на показатели качества обработки как за счет нарушения формы режущей кромки и ее расположения относительно базовых поверхностей заготовки, так и в результате изменения траектории движения инструмента.

При рациональной эксплуатации режущего инструмента в производственных условиях около 80 % всех его отказов связано с изнашиванием [11].

К причинам возникновения функциональных отказов ТС могут быть отнесены остаточные деформации, усталостные разрушения, старение, коррозия и изнашивание поверхностей трения деталей ТС.

Остаточные деформации возникают при больших локальных давлениях на поверхности детали или при воздействии нагрузок, вызывающих напряжения выше предела упругости материала. В первом случае происходит смятие поверхностей, во втором – скручивание, изгиб или растяжение деталей. Примером может служить изгиб и скручивание валов, коробление базовых и корпусных деталей ТС.

Усталость материала приводит к прогрессирующему разрушению детали в результате многократного воздействия переменных нагрузок. Усталостному разрушению обычно предшествует образование усталостных трещин, появление которых трудно установить при эксплуатации ТС. Из деталей ТС наиболее часто усталостным разрушениям подвергаются валы, подшипники, детали зубчатых передач.

При эксплуатации ТС происходит старение деталей – процесс постепенного и непрерывного изменения физико-механических свойств материала, ведущий к снижению их работоспособности. К отказам часто приводит старение деталей из неметаллических материалов в результате воздействия окружающей среды (кислорода воздуха), тепловых или силовых воздействий. Старение проявляется в снижении прочности, эластичности, появлении трещин и т.п. Примером может служить старение манжет, прокладок.

Старение деталей из металлических сплавов приводит обычно к увеличению их прочности и твердости при одновременном уменьшении пластичности и ударной вязкости материала. В результате старения перераспределяются остаточные напряжения, что приводит к нежелательным деформациям деталей.

Коррозия металлов приводит к их разрушению вследствие химического или электрохимического взаимодействия с внешней средой. Коррозия сопутствует взаимодействию трущихся поверхностей, причем механизм ее развития определяется свойствами среды, материалом трущихся пар, температурными условиями и другими факторами. Коррозии подвергаются также детали ТС, соприкасающиеся с технологическими жидкостями в случае их применения без антикоррозионных присадок (ингибиторов коррозии).

По статистике (50...80) % всех отказов [9], возникающих при эксплуатации машин, в том числе ТС, происходит из-за изнашивания поверхностей деталей. В результате износа сопрягаемых деталей происходит изменение их относительного положения и, соответственно, потеря начальных функциональных свойств изделия. Изнашиванию подвергаются детали подшипников скольжения, направляющие станков, зубья зубчатых колес, элементы шлицев и др.

Большинство процессов, приводящих к износу и разрушению деталей, начинается с их поверхности и определяется ее состоянием и состоянием поверхностного слоя.

2.2. Влияние качества поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей

В процессе изготовления и эксплуатации детали на ее поверхности возникают неровности, в слое металла, прилегающем к ней, изменяется структура, фазовый и химический состав. В детали возникают остаточные напряжения.

Слой металла с измененной структурой, фазовым и химическим составом по сравнению с основным металлом, из которого изготовлена деталь, называется *поверхностным слоем*. Именно этот слой оказывает основное влияние и изменяет эксплуатационные свойства детали.

В условиях эксплуатации поверхностный слой детали подвергается сильному воздействию: механическому, тепловому, световому, химическому, электрическому и др. Потеря деталью своего служебного назначения и ее разрушение, например, усталостная трещина, износ, эрозия, коррозия в большинстве случаев начинается с поверхности.

Следовательно, надежность работы детали, узла и ТС в целом во многом определяется качеством поверхностного слоя.

Параметры качества поверхностного слоя укрупнено можно разделить на геометрические и физико-механические (рис. 10). К геометрическим

параметрам относятся макрогеометрия, волнистость и микрогеометрия (шероховатость). Физико-механическое состояние поверхностного слоя характеризуют его структура, микротвердость и остаточные напряжения.



Рис. 10. Параметры качества поверхностного слоя

2.2.1. Геометрические параметры

Одной из основных геометрических характеристик качества поверхностного слоя деталей является *шероховатость (микрогеометрия)* поверхности, под которой согласно ГОСТ 25142 «Шероховатость поверхности. Термины и определения» понимают совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенную с помощью базовой длины l .

Шероховатость поверхности является пространственным объектом, имеющим трехмерную структуру. Количественная оценка шероховатости в трех измерениях теоретически возможна, однако, на практике получение ее связано с большими трудностями, поэтому в основном исследование шероховатости базируется на изучении сечений поверхности, т.е. ее профилей [13]. Поэтому формирование системы параметров микронеровностей профиля основано на использовании профильного метода, который достаточно полно отражает свойства поверхности и применим при любом функциональном назначении детали.

Используют несколько десятков различных параметров, характеризующих шероховатость поверхности. Однако выбор этих параметров и их число обуславливается, с одной стороны, практической необходимостью охарактеризовать все показатели качества изделий, зависящие от шероховатости поверхности, с другой стороны – наличием приборов. Наиболее часто в отечественной и зарубежной практике используют шесть основных параметров шероховатости (табл. 4) [13]. Те же параметры регламентированы ГОСТ 2789-73 и международными стандартами (ИСО Р468).

4. Классификация основных параметров шероховатости поверхности

Группа параметров	Параметр шероховатости	
	наименование	обозначение
Высотные	Наибольшая высота неровностей профиля	<i>R_{max}</i>
	Высота неровностей профиля по десяти точкам	<i>R_z</i>
	Среднее арифметическое отклонение профиля	<i>R_a</i>
	Средний шаг неровностей профиля	<i>S_m</i>
Шаговые	Средний шаг местных выступов профиля	<i>S</i>
Параметр формы	Относительная опорная длина профиля	<i>t_p</i>

Параметры ***R_{max}***, ***R_z*** и ***R_a*** связаны с высотными свойствами неровностей. Предпочтительным является параметр ***R_a***, так как он более представительнее, чем ***R_{max}*** и ***R_z***, отражает величину неровностей профиля, поскольку определяется по большему количеству точек профиля. В связи с этим параметром ***R_a*** нормируют шероховатость образцов сравнения, используемых для оценки шероховатости в промышленности.

Параметры ***R_{max}*** и ***R_z*** используют в тех случаях, когда по функциональным требованиям необходимо ограничить полную высоту неровностей профиля, а также когда прямой контроль ***R_a*** с помощью профилометров или образцов сравнения не представляется возможным (поверхности, имеющие малые размеры или сложную конфигурацию, например режущий инструмент).

Параметр ***R_{max}*** применяется также в качестве дополнения к параметрам ***R_a*** и ***R_z***, когда разработчик хочет оградить поверхность от отдельных больших выступов или впадин.

Шаговые параметры ***S_m*** и ***S*** характеризуют частотные свойства неровностей. На практике эти параметры используют редко, только при особых эксплуатационных требованиях к поверхности.

Относительная опорная длина профиля ***t_p*** характеризует фактическую площадь контакта при соприкосновении шероховатых поверхностей на заданном уровне сечения. Параметр ***t_p*** достаточно полно описывает форму

неровностей профиля, что позволяет нормировать многие важнейшие эксплуатационные свойства поверхностей, зависящие от высотных параметров профиля и формы неровностей.

Кроме микрогеометрии поверхностей на работоспособность сопрягаемых деталей большое влияние оказывает **волнистость** – совокупность периодически повторяющихся выступов и впадин с шагом, превышающим базовую длину ℓ , принятую ГОСТ 25142 для определения шероховатости. Волнистость занимает промежуточное положение между отклонениями формы и шероховатостью поверхности. Условно границу между отклонениями различных порядков можно установить по значению отношения шага S к высоте неровностей H . При $(S/H) < 40$ отклонения относят к шероховатости поверхности, при $1000 \geq (S/H) \geq 40$ – к волнистости, при $(S/H) > 1000$ – к отклонениям формы.

Параметры волнистости стандартом не регламентированы, но на практике используются:

- высота волнистости W_z ;
- наибольшая высота волнистости W_{max} ;
- средний шаг волнистости S_w .

Волнистость, как правило, имеет синусоидальный характер, что является следствием колебаний в ТС, возникающих из-за неравномерности сил резания, наличия неуравновешенных масс, погрешностей привода и т.п.

К параметрам, характеризующим макрогеометрию поверхностей, относятся отклонения формы поверхностей, регламентированные стандартами ГОСТ 31254 «ОНВ. Геометрические элементы. Общие термины и определения» и ГОСТ Р 53442 «ОНВ. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения».

Под **отклонением формы поверхности (профиля)** понимают отклонение формы реальной поверхности (реального профиля) от формы номинальной поверхности (номинального профиля).

Классификация допусков и отклонений формы плоских и цилиндрических поверхностей, а также частные их проявления приведены в табл. 5.

Шероховатость, волнистость, отклонения формы и расположения поверхностей деталей, возникающие при их изготовлении, а также в процессе работы изделия, приводят к уменьшению фактической площади контакта соприкасающихся деталей. Это, в свою очередь, ведет к большим контактными давлениям и деформациям, оказывающим значительное влияние на процессы, протекающие в соединении, – трение и износ, контактную жесткость и виброустойчивость, ударную прочность и сопротивление усталости, коррозионную стойкость и т.д. Выбор и назначение геометрических параметров качества поверхностей деталей необходимо производить с учетом взаимосвязи этих параметров с конкретными эксплуатационными свойствами изделия.

5. Классификация допусков и отклонений формы

Вид поверхности	Отклонения и допуски формы				
	поверхности		профиля		
Плоская	Комплексные показатели	Плоскостность	Прямолинейность (в плоскости)	Выпуклость	
Цилиндрическая		Цилиндричность			Овальность
					Огранка
					Конусообразность
					Бочкообразность
					Седлообразность
					–
					–
					–
*) По ГОСТ 24642.					

Из табл. 6 видно, что на каждое эксплуатационное свойство детали оказывают влияние от трех до шести параметров шероховатости. Однако из этого не следует необходимость нормирования всех параметров, влияющих на определенное эксплуатационное свойство детали, так как параметры шероховатости взаимосвязаны и известны соответствующие зависимости для различных видов механической обработки [15].

В связи с тем, что до 80 % отказов в работе машин происходит вследствие износа деталей в узлах трения [5], весьма важным является выявление закономерности влияния геометрических параметров качества поверхностей деталей на износостойкость соединений.

Характер и величина микронеровностей оказывают большое влияние на длительность приработки сопрягаемых поверхностей. Так, для повышения износостойкости трущихся деталей целесообразно создавать поверхности скольжения, шероховатость которых соответствует шероховатости поверхностей приработанных деталей (рис. 11), т.е. создавать оптимальную шероховатость Ra^{opt} .

6. Взаимосвязь геометрических параметров качества поверхностей деталей с их эксплуатационными свойствами [5, 15]

Эксплуатационные свойства деталей	Геометрические параметры качества поверхности									
	Шероховатость						Волнистость			Отклонение формы
	Ra	Rz	$Rmax$	Sm	S	tp	Wz	W_{max}	S_w	Δ
Подвижные соединения										
Износостойкость: сухое трение	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
граничное трение	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
жидкостное трение	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Неподвижные соединения										
Контактная жесткость	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
Прочность сопряжений	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+
Герметичность	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Виброустойчивость	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+
Свободные поверхности										
Усталостная прочность	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+
Коррозионная стойкость	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Прочность сцепления с покрытиями	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-
Примечания:										
1. В рамку заключены характеристики, оказывающие основное влияние на указанное эксплуатационное свойство. 2. Δ – наибольшая высота макроотклонений.										

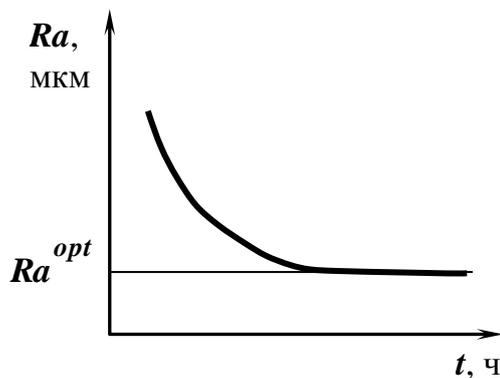


Рис. 11. Кривая, характеризующая изменение шероховатости на этапе приработки

В период приработки шероховатость может уменьшаться на 65...75 % [5]. При оптимальных значениях шероховатости поверхностей трения скорость изнашивания становится наименьшей, детали прирабатываются быстрее, возрастает долговечность машин и их точность.

На износ сопрягаемых деталей влияют не только высота и форма микронеровностей, но и их расположение относительно направления скольжения поверхностей. При большой площади контакта поверхностей с минимальными значениями шероховатости ($Ra < Ra^{opt}$ на рис. 12, а) доминирующую роль в износе играют адгезионные процессы [17]. В этом случае наиболее выгодно расположение неровностей, перпендикулярное направлению скольжения. При увеличении шероховатости ($Ra < Ra^{opt}$) изнашивание обусловлено максимальным истиранием и минимальный износ будет наблюдаться при совпадении направления скольжения с направлением неровностей обеих сопряженных деталей. Влияние расположения микронеровностей на износ более заметно при сухом и граничном трении. При жидкостном трении это влияние проявляется только при значительной высоте микронеровностей, так как слой смазки разделяет сопрягаемые детали.

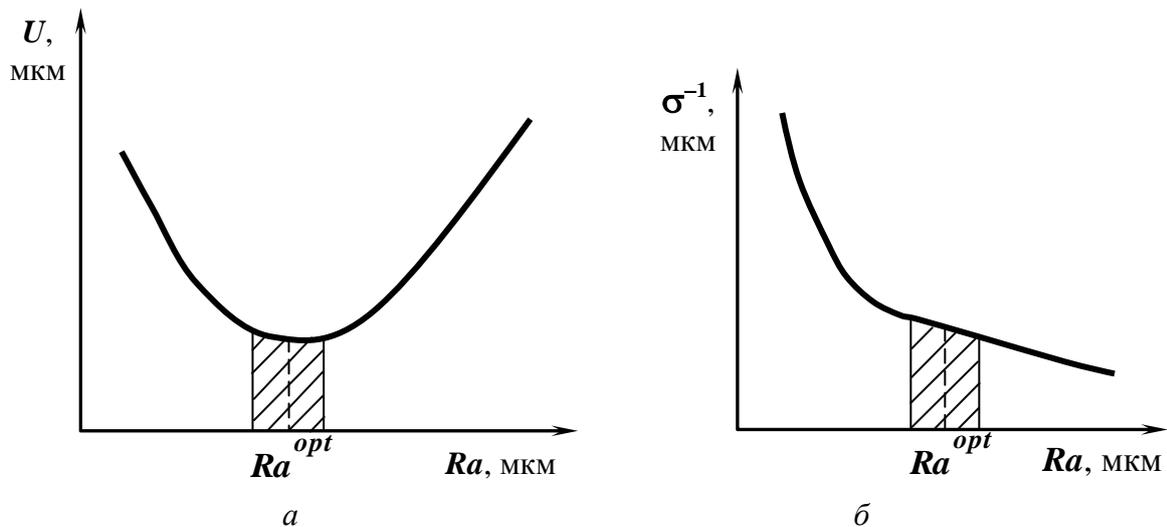


Рис. 12. Типовые графики зависимости величины износа U (а) и усталостной прочности σ^{-1} (б) деталей от их микрогеометрии (Ra)

Шероховатость, волнистость и отклонения формы поверхности необходимо учитывать при расчете зазоров и натягов в соответствующих посадках, как в подвижных, так и в неподвижных соединениях. Снижение величины неровностей в процессе приработки изделия способствует появлению дополнительных зазоров, которые могут достигнуть величины допуска на изготовление детали. В результате точность соединения будет полностью нарушена. В неподвижных соединениях микро- и макрометрические отклонения поверхностей приводят к уменьшению прочности соединения деталей вследствие

неодинакового натяга и смятия гребней неровностей на сопрягаемых поверхностях при запрессовке.

Микронеровности поверхностей деталей являются концентраторами напряжений и одной из причин снижения сопротивления усталости (рис. 12, б). Увеличение высоты неровностей оказывает особо сильное влияние на предел выносливости для деталей, изготавливаемых из высокопрочных легированных сталей [17].

На грубообработанных поверхностях, особенно в местах концентрации напряжений, быстрее возникает и распространяется коррозия металла, сопротивление усталости в этом случае снижается в несколько раз.

2.2.2. Физико-механическое состояние поверхностного слоя

Существенное влияние на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя детали оказывают его физико-механические свойства.

Поверхностный слой металла состоит из следующих характерных участков [9]: 1 – материал (металл) с исходной структурой; 2 – зона проявления упругих деформаций; 3 – наклепанный слой с искаженной кристаллической решеткой и увеличенным числом дислокаций и вакансий (зона пластических деформаций); 4 – наклепанный слой с сильно деформированной кристаллической решеткой, который характеризуется определенной ориентацией (текстурой) зерен, возникшей под влиянием тангенциальных сил резания или трения (текстурированный слой); 5 – слой повышенной твердости, содержащий окисные пленки, к которым примыкает аморфный адсорбированный слой из пленок влаги, газов и загрязнений.

Одной из характеристик физико-механического состояния поверхностного слоя является его деформационное упрочнение. Деформационное упрочнение поверхностного слоя оценивают на основе сопоставления микротвердости на поверхности детали и ее сердцевины. Показателями деформационного упрочнения являются *глубина h_H* и *степень U_H наклепа* [15]

$$U_H = \frac{H_{max} - H_{исх}}{H_{исх}} \cdot 100\%, \quad (41)$$

где H_{max} и $H_{исх}$ – соответственно максимальная микротвердость поверхностного слоя и сердцевины детали (рис. 13), МПа.

Степень наклепа U_H при механической обработке может достигать 60 % [5], а глубина наклепа h_H изменяется от (0,02...0,03) мм при шлифовании, до нескольких миллиметров – при обработке заготовок деталей поверхностно-пластическим деформированием (например, алмазным выглаживанием).

Увеличение степени деформационного упрочнения поверхностного слоя способствует повышению усталостной прочности и износостойкости деталей.

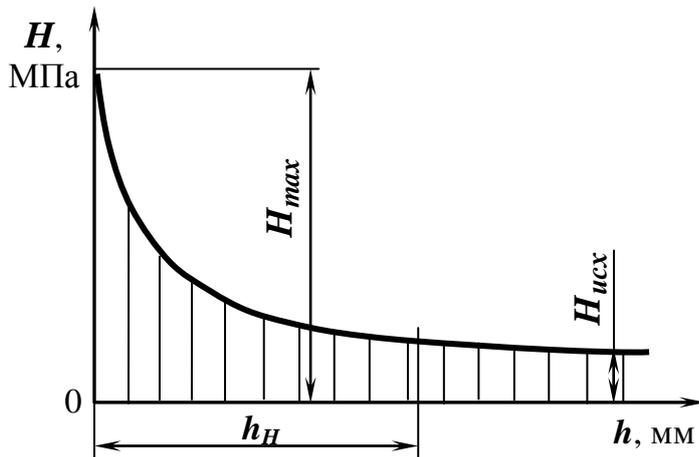


Рис. 13. График изменения микротвердости H поверхностного слоя детали после шлифования

Важной физико-механической характеристикой поверхностных слоев деталей является их напряженное состояние. Происхождение остаточных напряжений может быть связано как с технологией обработки, так и с эксплуатацией. В том и в другом случаях **остаточные напряжения** возникают при изменении объема металла вследствие фазовых и структурных превращений в поверхностных слоях и в результате силовых воздействий, вызывающих остаточную деформацию металла в локальных объемах поверхностных слоев.

По причинам возникновения остаточные напряжения могут быть:

- технологическими;
- эксплуатационными.

Технологические остаточные напряжения формируются в поверхностных слоях деталей при их различной обработке (точении, шлифовании и т.п.) и при восстановлении (наплавке, заварке, напылении).

Эксплуатационные остаточные напряжения формируются в результате многократно повторяющейся при работе изделия пластической деформации, повышения температуры и присутствия в зоне контакта газовых и жидких сред.

По протяженности силового поля остаточные напряжения разделяются на:

- напряжения 1-го рода;
- напряжения 2-го рода;
- напряжения 3-го рода.

Напряжения первого рода (макронапряжения) – охватывают область, соизмеримую с размерами детали;

Напряжения второго рода (микронапряжения) – распространяются на отдельные зерна металла или границу зерен;

Напряжения третьего рода (субмикронапряжения) – связаны с искажением атомной решетки кристалла.

Макронапряжения способствуют изменению геометрических параметров деталей. Микро- и субмикронапряжения приводят к образованию микротрещин в поверхностном слое деталей.

При эксплуатации изделия (а также при его хранении и транспортировании) происходит релаксация остаточных напряжений.

Релаксация (от латинского *relaxatio* – ослабление, уменьшение) – постепенное изменение напряжений в детали, сопровождающееся постоянной ее деформацией.

В результате **релаксации остаточных напряжений** из-за коробления детали изменяются ее геометрические параметры (размеры, форма и расположение поверхностей), изменяются усталостная прочность, износостойкость и коррозионная стойкость.

Остаточные напряжения в поверхностных слоях могут быть (рис. 14):

- растягивающими (положительными);
- сжимающими (отрицательными).

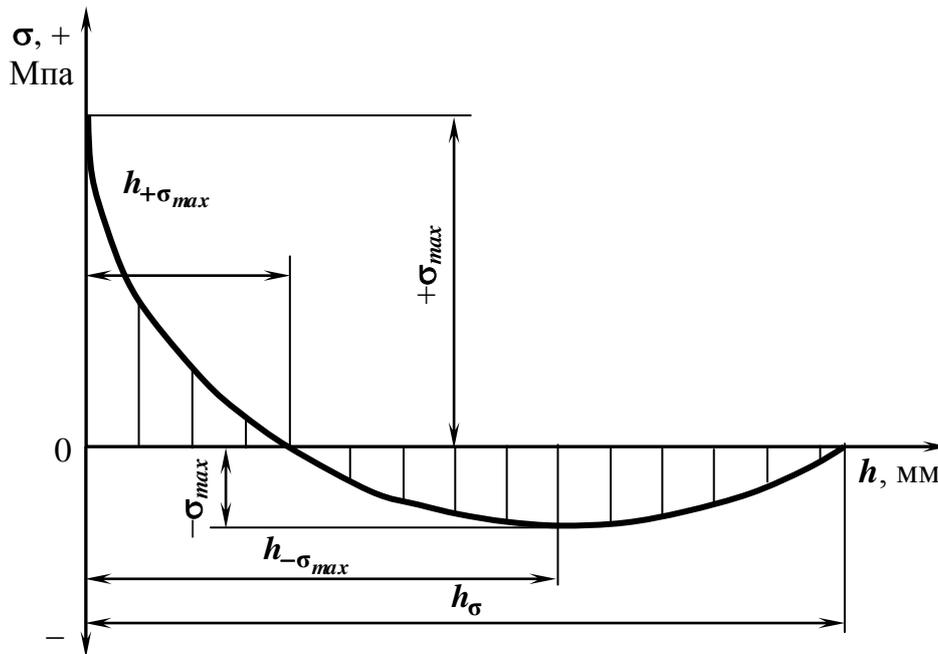


Рис. 14. Схема характерных точек эпюры остаточных напряжений после точения: h_{σ} – глубина наклепанного слоя; $h_{-\sigma_{max}}$ – глубина залегания сжимающих остаточных напряжений; $h_{+\sigma_{max}}$ – глубина залегания растягивающих напряжений; $-\sigma_{max}$ – максимальные сжимающие напряжения; $+\sigma_{max}$ – максимальные растягивающие напряжения; h – расстояние от поверхности

Необходимо избегать появления в деталях остаточных напряжений того же знака, что и знак напряжений, возникающих от рабочей (полезной) нагрузки, особенно в зонах концентрации растягивающих напряжений.

Основными причинами возникновения технологических макронапряжений являются нагрузки и температура, возникающая при механической обработке. Технологические микронапряжения возникают в результате фазовых превращений, изменения температуры, анизотропии механических свойств отдельных зерен и других факторов. Они, как правило, возникают в процессах кристаллизации и остывания металла, термообработки и обработки резанием.

Снятие или ослабление остаточных напряжений путем термической обработки или оптимизации режимов окончательной механической обработки способствует увеличению несущей способности материала детали, повышению износостойкости ее поверхностных слоев.

2.3. Закономерности изнашивания сопрягаемых деталей

Причиной изнашивания деталей является трение контактирующих поверхностей.

Согласно ГОСТ 27674 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения» **внешнее трение (трение)** – явление сопротивления относительно перемещению, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним.

При анализе работоспособности ТС по наличию и характеру движения различают следующие виды трения:

- трение покоя – трение двух деталей при микросмещениях до перехода к относительно движению;

- трение движения – трение двух деталей, находящихся в относительном движении.

По характеру относительного движения трение подразделяют на:

- трение качения;

- трение скольжения.

К трению качения относится трение движения двух твердых тел, при котором их скорости в точках касания одинаковы по величине и направлению. Трение скольжения возникает при движении соприкасающихся тел, скорости которых в точках касания различны по величине и направлению.

Интенсивность процесса изнашивания при трении скольжения во многом определяется наличием и характеристикой смазочного слоя на поверхностях трения.

Различают трение без смазки, граничное трение и жидкостное трение.

Трение без смазки (сухое трение) – трение двух твердых тел при отсутствии на поверхности трения смазочного материала любого типа.

Для трения без смазки характерно механическое зацепление микронеровностей и молекулярное взаимодействие в зоне контакта. Это самый неблагоприятный вид трения. При сухом трении, когда смазка отсутствует и неровности сопрягаемых поверхностей находятся в непосредственном контакте, создаются условия для наиболее интенсивного протекания процесса изнашивания.

В этом случае сила трения выражается по закону Амонтона–Кулона:

$$F = f_c \cdot N_c, \quad (42)$$

где N_c – нормальная сила, Н; f_c – коэффициент трения скольжения.

Коэффициент трения скольжения зависит от величины и направления микро- и макронеровностей поверхностей, физических свойств контактирующих материалов. Он возрастает с увеличением давления и уменьшением скорости относительного перемещения. Коэффициент трения чистых металлов или сплавов уменьшается при наличии на поверхности окисных пленок. Значения коэффициента трения лежат в широких пределах. Для металлических пар – $f_c = (0,06 \dots 0,20)$ [5, 17].

Граничное трение – возникает в том случае, когда поверхности трения разделены слоем смазки настолько малой толщины (менее 0,1 мкм), что свойства этого слоя отличаются от объемных свойств, а сила трения зависит только от природы и состояния трущихся тел. Значения коэффициента граничного трения скольжения – $f_c = (0,08 \dots 0,15)$ [5, 17]. Режим граничного трения очень неустойчив и это предел работоспособности узла трения. Если граничный слой разрушается – нагрузка превышает силы сцепления – в месте контакта возникает сухое трение и, как следствие, задиры, заклинивание и другие неполадки аварийного характера.

При **жидкостном трении** смазочный слой полностью отделяет взаимоперемещающиеся рабочие поверхности одну от другой и имеет толщину, при которой проявляются нормальные объемные свойства смазки. Коэффициент трения находится в пределах $(0,003 \dots 0,03)$ [5, 17], а сила трения в этом случае, определяемая лишь внутренним трением слоев в смазочном материале, в $(50 - 100)$ раз меньше, чем при трении без смазки. Для трущихся пар вязкость смазки должна быть наименьшей, но в то же время обеспечивающей жидкостное трение.

Согласно гидродинамической теории смазки силу жидкостного трения можно определить по формуле [17]

$$F = \frac{S \cdot V \cdot \mu}{h}, \quad (43)$$

где S – площадь скольжения, мм²; V – скорость относительного перемещения, м/с; μ – динамическая вязкость масла, Па·с; h – толщина слоя смазки, м.

При жидкостном трении достигаются наименьшие износы, поэтому в механизмах стремятся обеспечить этот вид трения. Примером является жидкостное трение в гидродинамических подшипниках скольжения.

Для большинства сопряжений деталей характерно смешанное (полужидкостное) трение [9] при несовершенной смазке, когда на различных участках поверхностей проявляются все три вида трения. При смешанном трении в зазорах, образованных микронеровностями, создаются микроклинья смазки, обладающие гидродинамической подъемной силой, а также, так называемые, микроэластогидродинамические пленки, обеспечивающие граничное трение. В зонах контакта поверхностей трения могут возникать также участки сухого трения при непосредственном взаимодействии пленок окислов и адсорбированных веществ или ювенильных (абсолютно чистых) поверхностей микровыступов. Именно в этих зонах происходит наиболее интенсивное изнашивание.

Смешанный вид трения возникает, например, при запуске и остановке шпинделя металлорежущего станка, когда происходит резкое колебание скорости и нагрузки на подшипник скольжения, а наличие смазочного материала недостаточное.

Наиболее характерным видом повреждения деталей при трении является износ.

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах (единицах длины, объема, массы и др.).

Изнашивание – процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Отделение материала обусловлено [9] истиранием поверхностей трения, а остаточная деформация имеет место при перемещении материала (смятии) под действием сил трения. Изнашивание сопровождается также усталостным разрушением поверхностных слоев под действием контактных нагрузок.

В зависимости от преобладающего процесса разрушения поверхности изнашивание разделяется на следующие виды [9]:

- **механическое изнашивание**, которое происходит, главным образом, в результате механического взаимодействия материалов пары трения;
- **молекулярно-механическое** изнашивание, сопровождаемое взаимодействием молекулярных или атомарных сил;
- **коррозионно-механическое изнашивание**, которое происходит при трении деталей из материалов, вступающих в химическое взаимодействие со средой.

Описание разновидностей и характеристики этих видов изнашивания приведены в табл. 7.

7. Классификация видов изнашивания деталей (ГОСТ 27674, [9])

Термин	Определение
Механическое изнашивание	
Абразивное изнашивание	Механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц
Гидроэрозионное изнашивание	Изнашивание поверхности в результате воздействия потока жидкости (газа)
Гидроабразивное изнашивание	Абразивное изнашивание в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости (газа)
Усталостное изнашивание	Механическое изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании
Кавитационное изнашивание	Механическое изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает местное высокое ударное давление или высокую температуру
Изнашивание при фреттинге	Механическое изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении
Молекулярно-механическое изнашивание	
Изнашивание при заедании	Изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую
Коррозионно-механическое изнашивание	
Окислительное изнашивание	Изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окружающей средой. Известны три формы окислительного изнашивания [9]: 1-я форма – удаление с поверхности трения химически адсорбированных пленок; 2-я форма – удаление микропленок окислов; 3-я форма – образование и выкрашивание слоев окисных пленок
Изнашивание при фреттинг-коррозии	Изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях. Изнашивание при фреттинг-коррозии включает три стадии [9]: 1-я стадия – пластическая деформация микровыступов, схватывание ювенильных участков металла, возникновение и разрушение окисных пленок; 2-я стадия – развитие коррозионно-усталостных процессов; 3-я стадия – добавление абразивного изнашивания

Если при взаимодействии поверхностей трения имеют место условия для возникновения изнашивания различных видов, то протекает тот процесс, который обладает большей скоростью (табл. 8).

8. Классификация процессов изнашивания по скорости разрушения связей [9]

Скорость элементарных процессов разрушения	Виды изнашивания			Вид повреждения
	механическое	молекулярно-механическое	коррозионно-механическое	
Быстро протекающие	абразивное	при заедании (адгезионное)	фреттинг-коррозия (3-я стадия)	недопустимый
Средней скорости (циклические процессы)	усталостное малоцикловое (при хрупком разрушении)	при молекулярном переносе	окислительное (3-я форма)	
Медленные процессы	усталостное	при избирательном переносе	окислительное (1-я и 2-я формы)	допустимый

Показателями изнашивания являются [9]: линейный износ, скорость изнашивания, интенсивность изнашивания и износостойкость.

Линейный износ U , мкм – изменение размера элемента детали при ее изнашивании, измеренное в направлении, перпендикулярном к поверхности трения.

Скорость изнашивания V_u , мкм/ч – отношение величины износа к времени, в течении которого он возник.

Интенсивность изнашивания I – отношение величины износа к пути трения, на котором происходило изнашивание. Эта величина является безразмерной, если линейный износ и путь трения измеряются в одних единицах, например, в м.

Практически скорость изнашивания определяют по формуле

$$V_u = 10^6 \cdot I \cdot V, \quad (44)$$

где V – скорость относительного скольжения, м/ч.

Тогда линейный износ детали можно оценить по формуле

$$U = 10^6 \cdot I \cdot V \cdot t, \quad (45)$$

где t – время, в течении которого происходит изнашивание детали, ч.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Интенсивность изнашивания зависит от величины нормальной нагрузки, действующей на сопрягаемые поверхности, и фактической площади контакта этих поверхностей. В свою очередь фактическая площадь контакта обусловлена геометрией контактирующих поверхностей. Она значительно меньше номинальной площади контакта, определяемой линейными размерами поверхностей и зависит от наличия на них волнистости, ее геометрических параметров, а также параметров шероховатости контактирующих поверхностей.

В связи с этим при оценке изнашивания рассматривают три случая.

1. В контакте находятся шероховатые, волнистые, неприработанные поверхности, при этом номинальная площадь контакта имеет размеры, соизмеримые с базовой длиной ℓ (по ГОСТ 2789 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики»), соответствующей шероховатости сопряженных поверхностей. В этом случае волнистость поверхностей на фактическую площадь их контакта не влияет. Примерами сопряжений, в которых реализуется такой контакт, являются сопряжения нежестких деталей с жесткими (например, направляющая планка и корпус); сопряжения, образующие высшие кинематические пары (зубья зубчатых колес в передаче, кулачки распределителя автомобиля и клапаны и т.п.).

К этому случаю можно отнести и контактирование шероховатых поверхностей с любой номинальной площадью контакта, если волнистость на них отсутствует.

2. Контактуют шероховатые, волнистые неприработанные поверхности с номинальной площадью контакта, размеры которой больше базовой длины ℓ . В этом случае волнистость во многом определяет фактическую площадь контакта сопрягаемых поверхностей. Контакт таких поверхностей происходит по вершинам волн, что уменьшает площадь контакта на 85...95 % [17]. Так контактируют направляющие металлорежущих станков, диски сцеплений автомобилей и т.д.

3. Контактуют приработанные поверхности деталей любой конфигурации, у которых на сопряженных поверхностях установилась оптимальная шероховатость, воспроизводящаяся в процессе изнашивания.

Для инженерных расчетов интенсивности изнашивания предложены зависимости (46) – (48) [17], соответствующие названным выше условиям.

Интенсивность изнашивания для неприработанных поверхностей без волнистости можно определить по формуле

$$I = K_2 \cdot \alpha \cdot K_{tv} \cdot p^{1 + \frac{t_y}{2\nu+1}} \cdot E^{\frac{2\nu t_y}{2\nu+1} - 1} \cdot \Delta^{\frac{\nu t_y}{2\nu+1}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_M}{\sigma_0} \right)^{t_y}; \quad (46)$$

для шероховатых непроработанных волнистых поверхностей

$$I = K_3 \cdot \alpha \cdot K_{tv} \cdot p^{1 + \frac{t_y}{5(2\nu+1)}} \cdot E^{\frac{2t_y(5\nu+2)}{5(2\nu+1)} - 1} \cdot \Delta^{\frac{\nu t_y}{2\nu+1}} \cdot \left(\frac{W_z}{R_w} \right)^{\frac{2t_y}{5(2\nu+1)}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_m}{\sigma_0} \right)^{t_y}; \quad (47)$$

для проработанных поверхностей

$$I = K_2 \cdot 15^{\frac{2t_y}{5}} \cdot \alpha \cdot K_{tv} \cdot p \cdot E^{\frac{t_y}{2} - 1} \cdot \tau^{0,5} \cdot \frac{1}{\alpha_r^{1/2}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_m}{\sigma_0} \right)^{t_y}; \quad (48)$$

где K_2 и K_3 – коэффициенты, зависящие от параметров t_y и ν (определяют по зависимостям, приведенным ниже); α – коэффициент упругой осадки (для упругого контакта металлических поверхностей можно принять $\alpha = 0,5$); K_{tv} – поправочный коэффициент, который можно определить по номограмме (рис. 15); p – номинальное давление трущихся поверхностей, для средних режимов работы $p \approx (0,1 - 10)$ МПа; E – модуль упругости материала детали, МПа (табл. П 2.1, прил. 2); t_y – величина показателя фрикционной усталости (табл. П 2.2, прил. 2); ν – параметр опорной кривой (см. ниже); Δ – безразмерный показатель шероховатости, который определяют по зависимости, приведенной ниже; W_z – высота волнистости, мкм (табл. П 3.1, прил. 3); R_w – радиус волнистости, мкм (см. табл. П 3.1, прил. 3); k – коэффициент, характеризующий напряженное состояние в контакте (см. табл. П 2.2, прил. 2); σ_0 – фрикционная усталость материала детали, МПа (см. табл. П 2.2, прил. 2); f_m – молекулярная составляющая коэффициента трения (см. табл. П 2.2, прил. 2); τ_0 – фрикционная константа сопротивления сдвигу, МПа (см. табл. П 2.2, прил. 2); α_r – коэффициент гистерезисных потерь (см. табл. П 2.2, прил. 2).

Фактическую площадь контакта при соприкосновении шероховатых поверхностей на заданном уровне сечения характеризует относительная опорная длина профиля tp . Относительную опорную длину

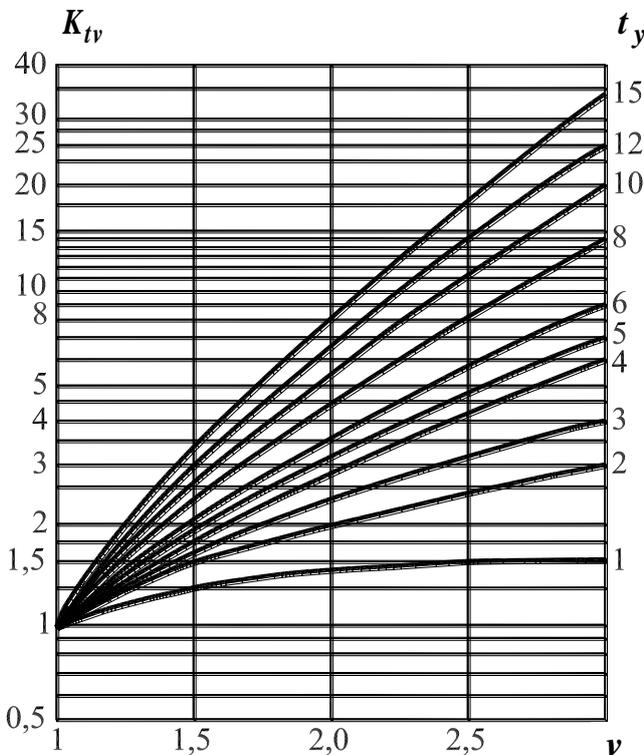


Рис. 15. Номограмма для определения коэффициента K_{tv} [17]

профиля на начальном участке опорной кривой можно определить по формуле

$$t_p = b \cdot \left(\frac{a}{R_{max}} \right)^v, \quad (49)$$

где b и v – параметры степенной аппроксимации начальной части опорной кривой (от линии выступов до средней линии); a – расстояние от линии выступов до заданного уровня p , мкм; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля, мкм.

В формулах интенсивности изнашивания в качестве степенных показателей использованы параметры опорной кривой, которые определяют по формулам

$$v = 2 tm \cdot \frac{Rp}{Ra} - 1, \quad (50)$$

$$b = tm \cdot \left(\frac{R_{max}}{Rp} \right)^v, \quad (51)$$

где tm – относительная опорная длина профиля на средней линии, ед.; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; Rp – наибольшая высота выступа (глубина сглаживания), т.е. расстояние между линией выступов и средней линией профиля, мкм.

Как правило, для расчетов принимают значения параметров шероховатости tm , Ra , Rp и R_{max} средние для пяти различных участков поверхности.

Зная параметры опорной кривой, можно определить коэффициенты K_2 и K_3

$$K_2 = 0,5 \cdot t_y^{-1 - \frac{1}{2v}} \cdot 2^{\frac{1}{2v}} \cdot K_1, \quad (52)$$

$$K_3 = K_2 \cdot K_1^{\frac{t_y}{2v+1}}, \quad (53)$$

где K_1 – коэффициент, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхностях твердых тел, обычно $K_1 \approx 0,2$.

При расчете интенсивности изнашивания используют также безразмерный показатель Δ :

$$\Delta = \frac{R_{max}}{r \cdot b^{1/v}}, \quad (54)$$

где r – приведенный радиус неровностей, мкм;

$$r = \sqrt{r_{II} \cdot r_{III}}, \quad (55)$$

где $r_{\text{п}}$ и $r_{\text{пр}}$ – среднее значение радиусов кривизны вершин выступов для поперечной и продольной профилограмм.

Для расчета на каждой профилограмме (снятых в продольном и поперечном направлениях) выбирают не менее пяти наиболее высоких выступов и находят для них ширину сечения d_i на расстоянии h_i , равном $0,3Ra$ или $0,06R_{\text{max}}$ от вершины (рис. 16). Тогда радиус каждого выступа

$$r_{\text{п}i} = \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{г}}^2} \cdot \frac{d_i^2}{8h_i}, \quad (56)$$

где $V_{\text{в}}$ и $V_{\text{г}}$ – вертикальное и горизонтальное увеличение.

Тогда средний радиус будет равен

$$r_{\text{п}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k r_{\text{п}i}, \quad (57)$$

где k – количество измеряемых выступов.

Аналогично определяют радиус $r_{\text{пр}}$.

Длину профилограмм следует выбирать так, чтобы на кривой было не менее пяти выступов.

Типичные значения радиусов кривизны выступов поверхностей, имеющих различную обработку, приведены в табл. П 3.2 (см. прил. 3), значения параметров шероховатости приработанных поверхностей деталей машин – в табл. П 3.3 (см. прил. 3).

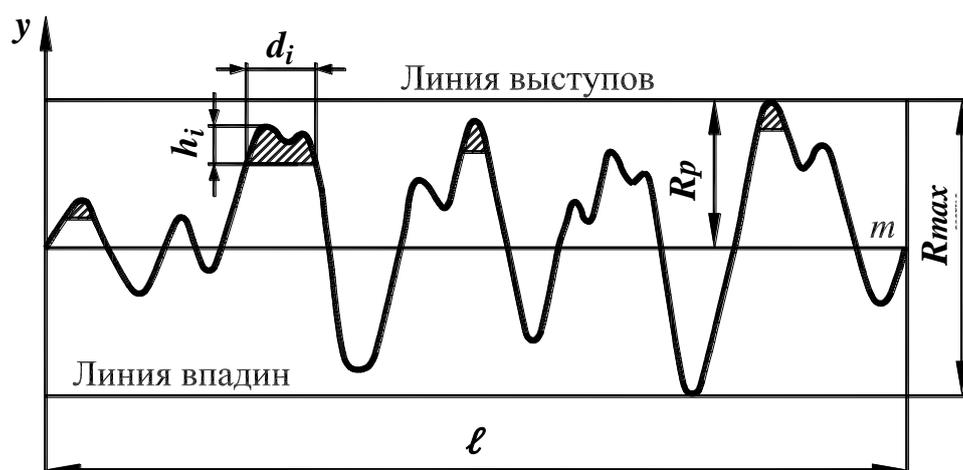


Рис. 16. Схема для расчета радиусов кривизны

Интенсивность изнашивания может меняться в широких пределах – от 10^{-3} до 10^{-12} (табл. 9).

9. Характерные значения интенсивности изнашивания различных деталей машин [6]

Изнашиваемая деталь	Сопрягаемая деталь	Интенсивность изнашивания
Гильзы цилиндров из чугуна	Торцевое кольцо из чугуна	$(1,1 \dots 5,6) \cdot 10^{-11}$
Поршневые кольца из чугуна	Гильзы цилиндров из чугуна	$(0,6 \dots 1,2) \cdot 10^{-11}$
Коленчатые валы из стали: – шатунные шейки – коренные шейки	Вкладыш из подшипникового сплава	$4 \cdot 10^{-11} \dots 5 \cdot 10^{-12}$ $4,6 \cdot 10^{-11} \dots 1,8 \cdot 10^{-12}$
Фрикционные элементы тормозов – дискового – колодочного	–	$8 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-10}$ $2 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-7}$
Направляющие станков	Чугун – чугун	$2 \cdot 10^{-9} \dots 4 \cdot 10^{-10}$
Режущий инструмент из сплава Т15К6 на воздухе без применения СОЖ	Сталь 40Х при $V = 150 \div 230$ м/мин	$(1,5 \div 6) \cdot 10^{-8}$
Калибры из твердого сплава	Сталь	10^{-10}

Пример 5. Рассчитать интенсивность изнашивания неприработанной поверхности без волнистости цапфы вала, изготовленного из стали 60ХФА. Узел трения – подшипник скольжения. Вкладыш подшипника изготовлен из биметалла с антифрикционным слоем из свинцовистой бронзы БрС30. Подшипник работает в условиях граничной смазки маслом.

Цапфа вала обработана круглым наружным шлифованием с последующим полированием.

Физико-механические характеристики стального вала для заданных условий эксплуатации находим по табл. П 2.1 и П 2.2 (см. прил. 2): $E = 2,2 \cdot 10^5$ МПа; $\sigma_0 = 700$ МПа; $f_M = 0,06$; $t_y = 7,9$; $k = 4$.

Номинальное давление в зоне контакта $p = 0,25$ МПа.

По шкале профилографа-профилометра и из профилограмм находим параметры шероховатости: $Ra = 0,16$ мкм; $Rmax = 0,98$ мкм; $Rp = 0,5$ мкм; $tm = 0,5$; $r = 650$ мкм.

По формулам (50) и (51) определяем v и b

$$v = 2 \cdot tm \cdot \frac{Rp}{Ra} - 1 = 2 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,5}{0,16} - 1 = 2,1,$$

$$b = tm \cdot \left(\frac{R_{max}}{R_p} \right)^v = 0,5 \cdot \left(\frac{0,98}{0,5} \right)^{2,1} = 2,05.$$

По формуле (54) определяем безразмерный показатель шероховатости Δ

$$\Delta = \frac{R_{max}}{r \cdot b^{1/v}} = \frac{0,98}{650 \cdot 2,05^{1/2,1}} = 1,07 \cdot 10^{-3}.$$

По формуле (52) находим коэффициент K_2

$$K_2 = 0,5^{t_y - 1 - 1/2v} \cdot 2^{1/2v} \cdot K_1 = 0,5^{6,66} \cdot 2^{0,24} \cdot 0,2 = 2,3 \cdot 10^{-3}.$$

По номограмме (см. рис. 15) определяем коэффициент K_{tv} . Для $t_y = 7,9$ и $v = 2,1$ $K_{tv} = 4,6$.

Для неприработанной поверхности без волнистости находим интенсивность изнашивания по формуле (46)

$$\begin{aligned} I &= K_2 \cdot \alpha \cdot K_{tv} \cdot p^{1 + \frac{t_y}{2v+1}} \cdot E^{\frac{2vt_y}{2v+1} - 1} \cdot \Delta^{\frac{vt_y}{2v+1}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_M}{\sigma_0} \right)^{t_y} = \\ &= 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 4,6 \cdot 0,25^{2,52} \cdot (2,2 \cdot 10^5)^{5,38} \cdot (1,07 \cdot 10^{-3})^{3,19} \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,06}{700} \right)^{7,9} = \\ &= 1,15 \cdot 10^{-12} \text{ м/м}. \end{aligned}$$

Пример 6. Рассчитать интенсивность изнашивания приработанной поверхности цапфы вала. Условия работы см. пример 5.

Физико-механические характеристики стального вала для заданных условий эксплуатации находим по табл. П 2.1 и П 2.2 (см. прил. 2): $E = 2,2 \cdot 10^5$ МПа; $f_M = 0,06$; $k = 4$; $\alpha_r = 0,02$; $\tau_0 = 0,3$ МПа (при контактировании стального вала с бронзовой втулкой).

Номинальное давление в зоне контакта $p = 0,5$ МПа.

Параметры шероховатости приработанной поверхности находим по табл. П 3.3 (см. прил. 3): $Ra = 0,05$ мкм; $R_{max} = 1,6$ мкм; $R_p = 0,12$ мкм; $r = 500$ мкм; примем $tm \approx 0,5$.

По формуле (50) находим v

$$v = 2 \cdot tm \cdot \frac{R_p}{Ra} - 1 = 2 \cdot 0,5 \cdot \frac{0,12}{0,05} - 1 = 1,2.$$

По формуле (52) находим коэффициент K_2

$$K_2 = 0,5^{t_y - 1 - 1/2v} \cdot 2^{1/2v} \cdot K_1 = 0,5^{6,48} \cdot 2^{0,42} \cdot 0,2 = 0,003.$$

По номограмме (см. рис. 15) определяем коэффициент K_{tv} . Для $t_y = 7,9$ и $v = 1,2$, $K_{tv} = 1,5$.

Для приработанной поверхности интенсивность изнашивания находим по формуле (48)

$$I = K_2 \cdot 15^{\frac{2t_y}{5}} \cdot \alpha \cdot K_{tv} \cdot p \cdot E^{\frac{t_y}{2} - 1} \cdot \tau_0^{0,5} \cdot \frac{1}{\alpha_r^{0,5}} \cdot \left(\frac{k \cdot f_M}{\sigma_0} \right)^{t_y} =$$

$$= 3 \cdot 10^{-3} \cdot 15^{3,16} \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 0,5 \cdot 220000^{2,95} \cdot 0,3^{0,5} \cdot \frac{1}{0,02^{0,5}} \cdot \left(\frac{4 \cdot 0,06}{700} \right)^{7,9} =$$

$$= 5,56 \cdot 10^{-11} \text{ м/м}.$$

2.4. Оценка надежности по критерию износостойкости

Оценка надежности по критерию износостойкости по существу – прогнозирование, при котором определяют технический ресурс и соответствующую вероятность безотказной работы изделия.

Для расчета технического ресурса изделия по критерию износостойкости необходимо установить критерии для оценки предельного износа отдельных деталей и сопряжений.

Согласно ГОСТ 30479 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, устанавливающие требуемый уровень безопасности» **предельный износ** – износ, соответствующий предельному состоянию изнашиваемого изделия или его составной части.

Предельный износ назначают таким образом, чтобы за время эксплуатации или в интервале между ремонтами вероятность его достижения не превышала значения, соответствующего рационально допустимому уровню безопасности работы изделия.

Можно выделить три группы критериев предельного износа [15]:

– в результате износа происходит скачкообразное изменение состояния изделия, приводящее его в опасное состояние для человека или окружающей среды (заклинивание механизма; поломка деталей; самовыключение или самовключение изделия, например, из-за износа торцовой поверхности зубчатых колес коробок передач и др.);

– износ приводит к попаданию изделия или узла в зону интенсивного выхода из строя (возникают удары, вибрации изделия, интенсивный износ поверхностей, повышается температура узлов);

– в результате износа характеристики машины выходят за допустимые или рекомендуемые пределы (например, износ зубчатых передач или крепежных элементов вызывают шум и вибрацию изделия; износ направляющих металлорежущего станка приводит к параметрическим отказам ТС).

Для деталей с поверхностным упрочнением предельный износ не должен превышать глубины упрочненного слоя.

По критерию попадания изделия в зону интенсивного выхода из строя в результате износа поверхностей деталей предельный износ $U_{\text{пред}}$ устанавливается в момент возникновения катастрофического износа (рис. 17). В этом случае технический ресурс детали по критерию износа t_{pu} будет соответствовать наработке детали до предельного износа.

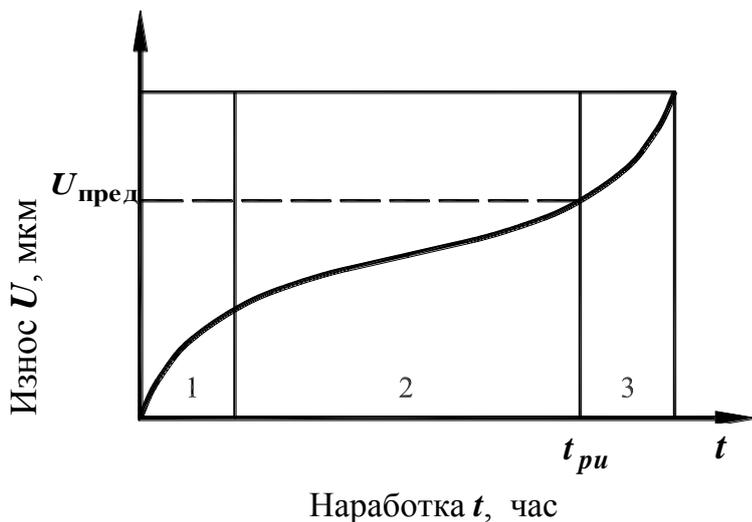


Рис. 17. Периоды изнашивания деталей: 1 – период приработки; 2 – период нормального износа; 3 – период катастрофического износа

Зная скорость износа поверхности трения, технический ресурс детали по критерию износа t_{pu} можно определить по формуле

$$t_{pu} = \frac{U_{\text{пред}}}{V_u}, \quad (58)$$

где $U_{\text{пред}}$ – предельный износ, мкм; V_u – скорость изнашивания, мкм/ч.

Для деталей, ремонтируемых при периодических плановых ремонтах, вводится понятие **допускаемый износ** – максимальный износ элемента изделия, при котором возможно его безопасное использование в течение последующего межремонтного цикла.

Если системой планово-предупредительного ремонта предусмотрено, что изнашиваемый элемент заменяется (восстанавливается) при k -м ремонте, то

допускаемый износ $U_{\text{доп}}$, устанавливаемый для $(k-1)$ -го ремонта, должен быть не более

$$U_{\text{доп}} = U_{\text{пред}} - V_{uk} \cdot t_k, \quad (59)$$

где V_{uk} – средняя скорость изнашивания между $(k-1)$ -м и k -м ремонтами, мкм/ч; t_k – продолжительность работы изделия между $(k-1)$ -м и k -м ремонтами.

Пример 7. Определить технический ресурс цапфы вала по критерию ее износа. При частоте вращения коленчатого вала $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ скорость его относительного скольжения $V = 16500 \text{ м/ч}$. Предельный износ цапфы вала $U_{\text{пред}} = 160 \text{ мкм}$ на диаметр или $U_{\text{пред}} = 80 \text{ мкм}$ на радиус.

Интенсивность изнашивания примем из примера 5 $I = 1,15 \cdot 10^{-12} \text{ м/м}$.

По формуле (44) определим скорость изнашивания

$$V_u = I \cdot V \cdot 10^6 = 1,15 \cdot 10^{-12} \cdot 16500 \cdot 10^6 = 1,89 \cdot 10^{-2} \text{ мкм/ч}.$$

По формуле (58) определим технический ресурс по критерию износа

$$t_{pu} = \frac{U_{\text{пред}}}{V_u} = \frac{80}{1,89 \cdot 10^{-2}} = 4233 \text{ ч}.$$

Если учитывать, что рассеивание размеров деталей и скорости изнашивания подчиняются нормальному закону распределения, вероятность безотказной работы можно определить с помощью нормируемой функции Лапласа $\Phi_0(z)$

$$P(t) = 0,5 + \Phi_0 \cdot \left(\frac{(U_{\text{пред}} \pm \Delta a) - \bar{V}_u \cdot t}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_V^2 \cdot t^2}} \right), \quad (60)$$

где Δa – отклонение среднего значения действительного размера деталей от номинального a , мкм (знак « \rightarrow » перед Δa ставят при отклонении среднего размера в сторону его уменьшения у «вала» и увеличения у «отверстия», в противном случае ставят знак « \leftarrow »); σ_a – среднее квадратическое отклонение размера деталей, мкм; \bar{V}_u – математическое ожидание скорости изнашивания, мкм/ч; σ_V – среднее квадратическое отклонение скорости изнашивания, мкм/ч; t – наработка изделия, в ч.

Для нормального закона распределения вероятность безотказной работы находят по табл. П 1.1 (прил. 1) по квантилю

$$u_p = \frac{(U_{\text{пред}} - \Delta a) - \bar{V}_u \cdot t}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_V^2 \cdot t^2}}. \quad (61)$$

На рис. 18 приведена схема оценки вероятности безотказной работы $P(t)$ при линейном законе изнашивания отверстия. Эта вероятность численно равна той части площади кривой $f(U)$, которая находится в пределах $U_0 \leq U \leq U_{\text{пред}}$. В рассматриваемом примере износ определяется по отношению к номинальному размеру детали a .

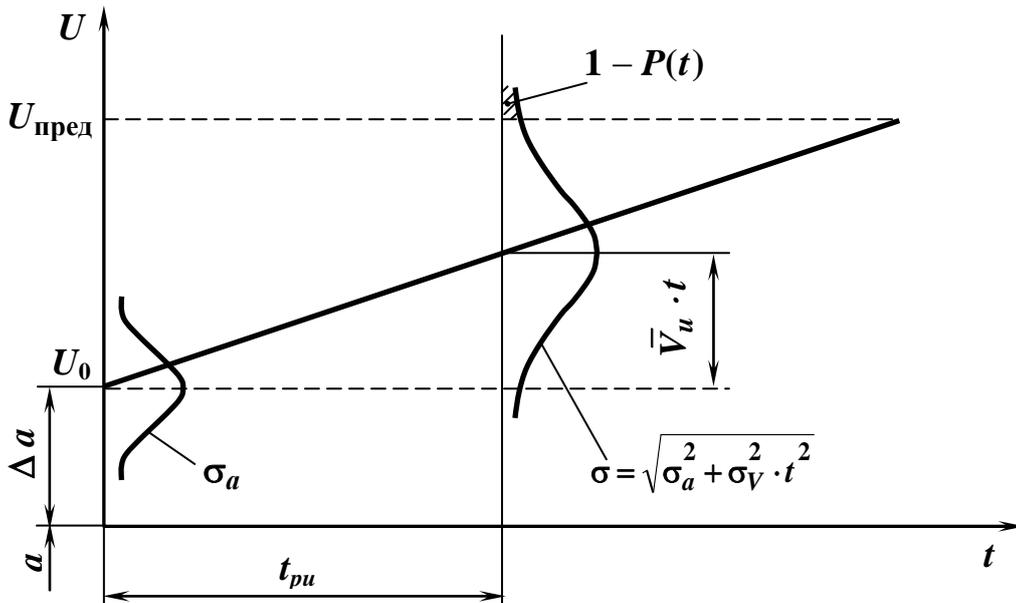


Рис. 18. Оценка надежности при линейном законе изнашивания

Пример 8. Определить вероятность безотказной работы вала для наработки изделия $t = 4000$ ч. Условия эксплуатации вала приведены в примерах 5 и 7. Износ детали (на участке нормального износа) подчиняется линейному закону.

Исходные данные. Допуск на диаметр цапфы вала $Td = 20$ мкм. Среднее квадратическое отклонение размера в расчете на радиус примем $\sigma_a = Td / 12 = 1,67$ мкм. Отклонение среднего значения от номинала $\Delta a = 0$ мкм. Математическое ожидание скорости изнашивания $\bar{V}_u = 0,0189$ ч. Среднее квадратическое отклонение скорости изнашивания примем $\sigma_V = 0,003$ мкм/ч. Предельный износ (в расчете на радиус) $U_{\text{пред}} = 80$ мкм.

Квантиль u_p для заданных условий будет равен

$$u_p = \frac{U_{\text{пред}} - \Delta a - \bar{V}_u \cdot t}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_V^2 \cdot t^2}} = \frac{80 - 0 - 0,0189 \cdot 4000}{\sqrt{1,67^2 - (0,003 \cdot 4000)^2}} = 0,33.$$

По табл. П 1.1 (см. прил. 1) для нормального закона распределения вероятность безотказной работы при наработке изделия $t = 4000$ ч будет равна $P(t) = 0,62$.

Одним из показателей долговечности изделия является гамма-процентный ресурс t_γ (см. п. 1.5.2).

В этом случае в формуле (60) искомым является t , которое входит в аргумент функции Лапласа. Аргумент функции Лапласа будет являться квантилем u_p нормального распределения, т.е. тем его значением, которое соответствует данной вероятности $P(t_\gamma)$.

Из формулы (61) получим для определения гамма-процентного ресурса t_γ квадратное уравнение

$$u_p \cdot \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_V^2 \cdot t_\gamma^2} = [(U_{\text{пред}} - \Delta a) - \bar{V}_u \cdot t_\gamma]. \quad (62)$$

Для заданного значения $P(t_\gamma)$ по таблицам функции Лапласа (см. табл. П 1.1, прил. 1) находят соответствующее значение u_p и затем из уравнения (62) – гамма-процентный ресурс t_γ .

Алгоритм последовательности расчета показателей изнашивания приведен в прил. 4.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные причины потери работоспособности ТС.
2. Назовите шесть основных параметров шероховатости.
3. Назовите основные параметры волнистости.
4. Приведите классификацию допусков (отклонений) формы.
5. На какие эксплуатационные свойства деталей оказывает основное влияние параметр шероховатости Ra ?
6. На какие эксплуатационные свойства деталей оказывает основное влияние параметр шероховатости $Rmax$?
7. Приведите типовой график зависимости величины износа деталей от их микрогеометрии.

8. Назовите основные характеристики физико-механического состояния поверхностного слоя деталей.
9. Приведите классификацию остаточных напряжений.
10. Приведите классификацию видов трения по наличию смазки.
11. Приведите классификацию видов изнашивания деталей.
12. Дайте определения износа и износостойкости.
13. Какие разновидности контакта различают при расчете интенсивности изнашивания?
14. Какие параметры шероховатости поверхностей учитывают при расчете интенсивности изнашивания?
15. Какие параметры волнистости поверхности учитывают при расчете интенсивности изнашивания?
16. Дайте определения долговечности и технического ресурса.
17. Назовите критерии предельного износа.
18. Назовите периоды изнашивания деталей.
19. Чем отличается предельный износ от допускаемого износа?
20. По какой формуле можно определить технический ресурс детали по критерию износа?
21. Дайте определение вероятности безотказной работы.
22. Дайте определение гамма-процентного ресурса.

3. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЯЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

3.1. Общие положения по оценке надежности технологических систем

Технологические требования к методам оценки надежности ТС ТП в машиностроении и приборостроении установлены ГОСТ 27.002.

Надежность оценивают в основном в двух случаях:

- в массовом и серийном производстве для определения надежности ТС действующих ТП и операций, установления причин недостаточной их надежности, разработки мероприятий по устранению причин отказов;
- при технологической подготовке производства для выбора наилучшего варианта ТП.

При расчете надежности ТС параметры, определяющие работоспособное состояние, согласно ГОСТ 27.203, следует разделить на три группы:

- характеризующие качество изготавливаемой продукции;
- характеризующие производительность;
- характеризующие величину затрачиваемых ресурсов.

Наиболее важной для современного производства является оценка надежности ТС по параметрам качества изготавливаемой продукции. Именно здесь заложен один из источников стабильного повышения технического уровня продукции.

В зависимости от уровня ТС (см. раздел 1) все показатели надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции подразделяются на четыре группы:

- по точности ТП и средств технологического оснащения;
- по технологической дисциплине;
- по выполнению заданий по параметрам качества продукции;
- комплексные показатели.

Показатели различных групп предназначены для оценки надежности тех или иных видов ТС в соответствии с табл. 10.

Для оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции в зависимости от вида ТС и целей оценки обычно используют расчетные, опытно-статистические, регистрационные или экспертные методы.

Для предварительной оценки надежности ТС по параметрам точности, как правило, используют метод квалитетов.

10. Области применения групп показателей надежности ТС по ГОСТ 27.202

Вид технологической системы	Группы показателей надежности ТС			
	по точности	по технологической дисциплине	по выполнению заданий по качеству	комплексные показатели
ТС технологической операции	+	–	+	–
ТС технологического процесса	+	+	+	+
ТС производственного подразделения	–	+	+	+
ТС предприятия	–	+	+	+

Примечание. Знак «+» означает возможность применения группы показателей для ТС данного вида.

Расчетные методы основаны:

- на использовании математических моделей изменения параметров качества изготавливаемой продукции или параметров ТП с учетом физики отказов (качественной природы процесса изнашивания, старения, температурных деформаций и т.п.) и имеющихся априорных данных о свойствах ТС данного класса;

- на использовании данных о закономерностях изменения во времени факторов (износ инструмента, температурные и упругие деформации и т.п.), влияющих на один или одновременно несколько параметров качества изготавливаемой продукции.

Опытно-статистические (измерительные) методы основаны на использовании данных измерений параметров качества изготавливаемой продукции, полученных в результате специального выборочного обследования ТС и (или) специальных испытаний ТС и ее элементов.

Регистрационные методы не требуют проведения специального выборочного обследования и основаны на анализе информации, регистрируемой в процессе управления предприятием (результаты контроля точности ТП, число принятых партий, дефектов и т.п.). Эта информация удовлетворяет требованиям достоверности и однородности и может быть достаточной для оценки значения искомого показателя.

Экспертные методы используют результаты опроса экспертной группы, располагающей информацией о надежности данной ТС и факторах, влияющих на качество изготавливаемой продукции. Экспертные методы обычно применяются при невозможности или нецелесообразности использования указанных выше методов.

Метод квалитетов основан на сравнении требуемых значений параметров ТС с их предельными возможными значениями, установленными в справочной или нормативно-технической документации.

В практике наибольшее применение нашли показатели оценки надежности по параметрам точности и по выполнению заданий по параметрам качества изготавливаемой продукции.

3.2. Оценка надежности технологических систем по параметрам точности

3.2.1. Условия надежности ТС

При оценке надежности ТС по параметрам точности определяют возможность применения рассматриваемого ТП для изготовления продукции с заданными параметрами, устанавливают изменение точностных характеристик ТС во времени и их соответствие требованиям нормативно-технической документации; получают информацию для регулирования ТП (операции).

Номенклатуру контролируемых параметров и показателей точности ТС определяют в процессе анализа точности и стабильности ТП (операций). Надежность ТС оценивают только по тем параметрам точности, уровень которых зависит от технологии изготовления, и которые оказывают основное влияние на эксплуатационные характеристики изделия.

Оценку точности ТС производят по альтернативному и количественному признаку.

При контроле по *альтернативному признаку* проверяют соответствие параметров ТП и средств технологического оснащения требованиям, установленным в нормативно-технической документации. При контроле точности ТС по альтернативному признаку на этапе технологической подготовки производства предпочтение следует отдавать методу квалитетов.

При контроле по *количественному признаку* определяют значения показателей точности. Основным показателем точности является *коэффициент точности* по контролируемому параметру

$$K_T = \frac{T}{\omega}, \quad (63)$$

где T – допуск на контролируемый параметр; ω – погрешность (поле рассеяния) или разность наибольшего и наименьшего значений контролируемого параметра (мм) за установленную наработку ТС, определяемые с доверительной вероятностью γ по выражению

$$\omega = \ell(\gamma) \cdot S_x, \quad (64)$$

где $\ell(\gamma)$ – коэффициент, зависящий от закона распределения контролируемого параметра и доверительной вероятности; S_x – среднее квадратическое отклонение (СКО) контролируемого параметра, мм. Для нормального закона распределения и $\gamma = 0,9973$ $\ell(\gamma) = 6$; для закона Максвелла – $\ell(\gamma) = 5,25$. Значения $\ell(\gamma)$ для других законов распределения приведены в ГОСТ 27.002.

Коэффициент K_T может служить характеристикой потенциальных возможностей данного ТП в случае настройки ТС на середину поля допуска (рис. 19). Поэтому кроме K_T определяют и другие параметры, чувствительные к положению распределения контролируемого параметра внутри поля допуска. Одним из простейших параметров является *коэффициент смещения* контролируемого параметра, характеризующий стабильность ТП,

$$K_c = \frac{\bar{\Delta}(t)}{T}, \quad (65)$$

где $\bar{\Delta}(t)$ – отклонение среднего значения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени t

$$\bar{\Delta}(t) = |\bar{x}(t) - x_0|, \quad (66)$$

где $\bar{x}(t)$ – среднее значение контролируемого параметра в момент времени t ; x_0 – значение параметра, соответствующее середине поля допуска.

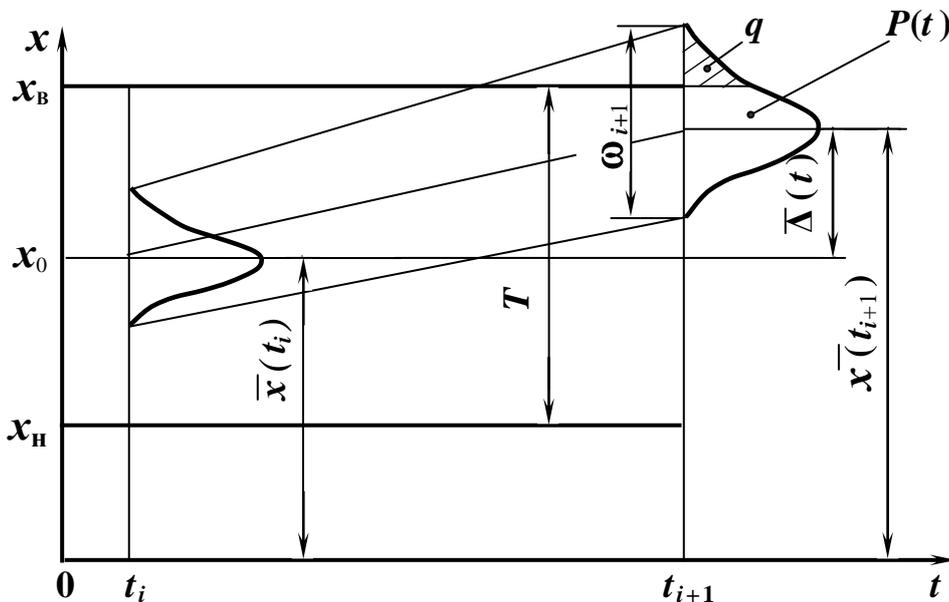


Рис. 19. Схема расположения поля рассеяния ω и поля допуска T для контролируемого параметра x : $P(t)$ – вероятность безотказной работы; q – вероятность появления брака; x_B и x_H – соответственно наибольшее и наименьшее значения контролируемого параметра

Коэффициент смещения характеризует относительную величину систематической погрешности.

Условиями надежности ТС (обработка заготовок без брака) являются [4, 6]

$$K_T \geq 1,2; \quad K_c < 0,5 \cdot \left(1 - \frac{1}{K_T}\right). \quad (67)$$

Контроль точности ТС по количественному признаку производят [5] при разработке ТП на этапе технологической подготовки производства (ТПП) (выбор предпочтительного варианта ТП), а также при выборе методов и планов статистического регулирования действующего ТП (операций) и при замене или модернизации средств технологического оснащения.

При контроле точности ТС по количественному признаку на этапе ТПП используют главным образом расчетные методы. При контроле точности ТС на этапе изготовления продукции используют опытно-статистические методы.

3.2.2. Расчетный метод определения показателей точности ТС

На этапе ТПП определение показателей точности ТС технологической операции осуществляют методом *элементарных погрешностей*, основанным на расчете суммарной погрешности контролируемого параметра.

Если элементарные погрешности взаимно независимы, суммарную погрешность ω контролируемого параметра определяют по формуле

$$\omega = K \cdot \sqrt{\lambda_1 \cdot \omega_1^2 + \lambda_2 \cdot \omega_2^2 + \dots + \lambda_n \cdot \omega_n^2}, \quad (68)$$

где K – коэффициент риска; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – коэффициенты, учитывающие законы распределения элементарных погрешностей; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ – предельные значения элементарных погрешностей (например, погрешность металлорежущего станка, погрешность закрепления, погрешность базирования, погрешность изготовления приспособления, погрешность настройки и др.).

Коэффициент риска K выбирают в зависимости от принятого риска (вероятности появления брака) q . При нормальном законе распределения элементарных погрешностей и равномерном их выходе за обе границы поля допуска значение K можно выбрать по табл. 11.

11. Значения коэффициента риска K

$q, \%$	32,00	10,00	4,50	1,00	0,27	0,10	0,01
K	1,00	1,65	2,00	2,57	3,00	3,29	3,89

При наличии фактических данных о законе распределения элементарных погрешностей коэффициенты $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ рассчитывают по ГОСТ 19415. При нормальном законе распределения коэффициенты $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ равны 0,111.

Для укрупненных расчетов точности линейных и угловых размеров за величину ω принимают производственную погрешность, определяемую по формуле

$$\omega = \omega_6 + \omega_{TC}, \quad (69)$$

где ω_6 – погрешность базирования по контролируемому параметру; ω_{TC} – погрешность технологической системы, определяемая по [16].

По рассчитанному значению ω можно определить коэффициент точности K_T .

Пример 9. Определить коэффициент точности ТС операции обработки плоской поверхности заготовки корпусной детали в размер $150h9_{(-0,1)}$ на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ торцовой фрезой. Заготовка закреплена в универсально-сборном приспособлении.

Исходные данные:

- допуск размера $T = 100$ мкм;
- погрешность станка по геометрическим параметрам $\omega_1 = 10$ мкм;
- погрешность базирования $\omega_2 = \omega_6 = 0$ (вследствие совпадения измерительной и технологической (установочной) баз);
- погрешность закрепления $\omega_3 = 20$ мкм;
- погрешность изготовления приспособления $\omega_4 = 20$ мкм;
- погрешность настройки фрезы на размер $\omega_5 = 40$ мкм;
- погрешность, связанная с размерным износом инструмента $\omega_6 = 0$ (компенсируется поднастройкой в автоматическом режиме);
- погрешность измерения детали $\omega_7 = 10$ мкм;
- погрешность измерения при настройке рабочих органов станка на нулевую точку $\omega_8 = 5$ мкм.

1. Определяем по формуле (68) величину суммарной погрешности контролируемого параметра $150 h9_{(-0,1)}$, предполагая, что распределения элементарных погрешностей близки к закону Гаусса. Тогда $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_8 = 0,111$. Принимаем риск $q = 0,27$ %, тогда значение коэффициента риска $K = 3,0$.

$$\begin{aligned} \omega &= 3,0 \cdot \sqrt{0,111 \cdot \omega_1^2 + 0,111 \cdot \omega_2^2 + \dots + 0,111 \cdot \omega_8^2} = \\ &= 3,0 \cdot \sqrt{0,111 \cdot (10^2 + 0^2 + 20^2 + 20^2 + 40^2 + 0^2 + 10^2 + 5^2)} = 51 \text{ мкм.} \end{aligned}$$

2. Определяем по формуле (63) коэффициент точности

$$K_T = \frac{T}{\omega} = \frac{100}{51} = 2,0.$$

Так как $K_T = 2,0 > 1,2$, условие надежности ТП по этому критерию выполнено.

3.2.3. Опытно-статистический метод

Опытно-статистические методы определения параметров точности ТС применяют для действующего производства. Определение параметров точности ТС технологической операции производят на основе статистической обработки мгновенных выборок.

Среднее арифметическое значение или центр рассеяния контролируемого параметра определяют по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (70)$$

если результаты измерения x_i записаны в абсолютных значениях параметра, и по формуле

$$\bar{x} = x_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (71)$$

если результаты измерения x_i записаны в отклонениях от заданного начала отсчета x_0 .

СКО контролируемого параметра по мгновенной выборке определяют по формуле

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (72)$$

Среднее квадратическое отклонение можно определить также по размаху значений в мгновенной выборке

$$S_x = \frac{R}{D_2}, \quad (73)$$

где $R = x_{max} - x_{min}$ – величина размаха в мгновенной выборке; D_2 – коэффициент, изменяющийся в зависимости от объема n мгновенной выборки (значения коэффициента D_2 при $n = H$ и $G > 15$ определяют по табл. П 1.3, прил. 1).

Поле рассеяния ω определяют по формуле (64).

По полученным значениям ω и \bar{x} можно определить коэффициенты точности K_T и смещения K_c .

Оценку достоверности полученных значений параметров точности ТС производят методом доверительных интервалов, исходя из общего объема выборки n .

Доверительный интервал для величины контролируемого параметра x будет равен

$$I_{\bar{x}} = (\bar{x} - \varepsilon \leq x \leq \bar{x} + \varepsilon), \quad (74)$$

в котором ε определяют по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{n}} t_p \cdot S, \quad (75)$$

где t_p – квантиль распределения Стьюдента, определяемый для заданной доверительной вероятности P по таблице ГОСТ 27.202 в зависимости от P и числа степеней свободы $k = n - 1$.

Пример 10. Определить надежность ТП обработки вала по диаметру $\varnothing 20 js8 (\pm 0,008)$ на токарном полуавтомате с ЧПУ по мгновенной выборке и оценить достоверность полученных значений параметров точности. Мгновенная выборка состояла из семи деталей, у которых определены отклонения от номинального диаметра 20 мм: +0,010; +0,008; +0,005; +0,006; +0,002; -0,002; 0 мм.

1. Рассчитываем по формуле (71) среднее арифметическое значение диаметра

$$\bar{x} = 20 + \frac{0,010 + 0,008 + 0,005 + 0,006 + 0,002 - 0,002 - 0}{7} = 20,004 \text{ мм.}$$

2. Рассчитываем по формуле (72) СКО

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{7-1} \left[(0,010-0,004)^2 + (0,008-0,004)^2 + (0,005-0,004)^2 + (0,006-0,004)^2 + (0,002-0,004)^2 + (-0,002-0,004)^2 + (0-0,004)^2 \right]} = 0,004 \text{ мм.}$$

3. Определяем по формуле (75) величину ε ; для $n = 7$ и $P = 0,99$ $t_p = 3,707$ (см. табл. П 1.4, прил. 1), тогда

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{7}} \cdot 3,707 \cdot 0,004 = 0,006 \text{ мм.}$$

4. Определяем по формуле (74) доверительный интервал значений диаметра

$$I_{\bar{x}} = (20,004 - 0,006 \leq x \leq 20,004 + 0,006) = (19,998 \leq x \leq 20,010) \text{ мм.}$$

Следовательно с вероятностью $P = 0,99$ действительный диаметр обработанной детали будет находиться в интервале от 19,998 до 20,010 мм.

5. Предполагая, что рассеяние размеров при обработке подчиняется нормальному закону распределения, по формуле (64) определим поле рассеяния значений контролируемого параметра

$$\omega = 6 \cdot 0,004 = 0,024 \text{ мм.}$$

6. Определяем по формуле (63) коэффициент точности

$$K_T = \frac{0,032}{0,024} = 1,33.$$

7. Определяем по формуле (65) коэффициент смещения при отклонении среднего значения контролируемого параметра от середины поля допуска

$$\Delta(t) = |\bar{x}(t) - x_0| = |\bar{x} - x_0| = |20,004 - 20,0| = 0,004 \text{ мм}$$

$$K_c = \frac{0,004}{0,016} = 0,25.$$

8. Проверяем условие надежности ТП по формулам (67)

$$K_T = 1,33 \geq 1,2; \quad K_c = 0,2 > 0,5 \cdot \left(1 - \frac{1}{1,33}\right) = 0,125.$$

Следовательно, ТП надежен, но не стабилен. Для обеспечения стабильности необходимо смещение середины поля рассеяния $\bar{x}(t)$ (см. рис. 19) относительно середины поля допуска x_0 путем изменения настроечного размера.

3.2.4. Метод квалитетов

Оценка точности ТС методом квалитетов производится на этапе ТПП при наличии справочной или нормативно-технической документации, регламентирующей возможные значения параметров качества изготавливаемой продукции в зависимости от точности применяемых средств технологического оснащения и предметов производства.

Точность ТС технологической операции считается удовлетворительной при выполнении следующих условий:

– требуемые значения параметров точности изготавливаемой продукции принадлежат области их возможных значений, установленных (регламентированных) в базовой документации (например, соответствуют допустимым отклонениям аналогичных параметров образца изделия при проверке точности средств технологического оснащения в работе);

– условия функционирования ТС (температура, влажность, уровень вибраций и т.п.), техническое состояние применяемых средств технологического оснащения (биение шпинделя, жесткость и т.п.) и параметры используемых предметов производства (твердость материала, шероховатость поверхности и т.п.) соответствуют установленным в базовой документации.

Пример 11. Оценить точность ТС токарной операции методом квалитетов. Операцию производят на автомате продольного точения 1П16 класса точности П. В качестве заготовки используют прутки диаметром 16 мм из автоматной стали А20. Максимальное возможное смещение режущей кромки резца (из-за его износа, тепловых деформаций и т.п.) не превосходит $\Delta_{\text{см}} = 7$ мкм. Допуск на диаметр образца, используемого при настройке станка $T_0 = 8$ мкм. Допуск контролируемого параметра диаметром $\varnothing 14h8$ равен $IT = 27$ мкм.

1. Определяем возможное отклонение контролируемого параметра, считая, что другие погрешности отсутствуют

$$\Delta_{\Sigma} = T_0 + 2\Delta_{\text{см}} = 8 + 2 \cdot 7 = 22 \text{ мкм.}$$

2. Сравнивая величину Δ_{Σ} с допуском размера $\varnothing 14h8 IT = 27$ мкм, делаем вывод о том, что точность рассматриваемой ТС следует считать удовлетворительной.

3.3. Оценка надежности технологической системы по выполнению заданий по параметрам качества изготавливаемой продукции

3.3.1. Расчетный метод

Оценку надежности ТС (выполнения заданий) по параметрам качества изготавливаемой продукции производят с целью определения вероятности того, что ТС обеспечит (обеспечивает) изготовление продукции в соответствии с требованиями нормативно-технической документации.

Оценка надежности ТС по выполнению задания должна производиться для ТП (операций), оказывающих решающее влияние на качество готовой продукции, а также по которым получены неудовлетворительные результаты оценки точности ТС.

При оценке надежности ТС по вероятности выполнения задания для технологической операции используют **вероятность выполнения задания** по одному (k -му) или нескольким параметрам качества изготавливаемой продукции в момент времени t .

$$P_k(t) = P\{x_{\text{н}k} \leq x_k(t) \leq x_{\text{в}k}\}, \quad (76)$$

где $x_k(t)$, $x_{вк}$, $x_{нк}$ – соответственно фактическое, верхнее и нижнее значение k -го контролируемого параметра.

Рассмотрим ТП, состоящий из ряда операций O_1, O_2, \dots, O_n (рис. 20). Входными k -ми параметрами качества на каждой операции являются величины $x_k^0, x_k^1, \dots, x_k^{n-1}$, изменяющиеся под действием влияющих величин z_k , выходной параметр x_k^n характеризует качество готовой детали. Если погрешности обработки на последовательно выполняемых операциях ТП независимы, показатели выполнения заданий по k -му параметру качества изготавливаемой продукции определяют по формуле

$$P_k(t) = \prod_{i=1}^n P_k^i(t), \quad (77)$$

где P_k^i – соответствующий показатель выполнения задания по k -му параметру качества изготавливаемой продукции для i -й операции ТП (см. рис. 20).

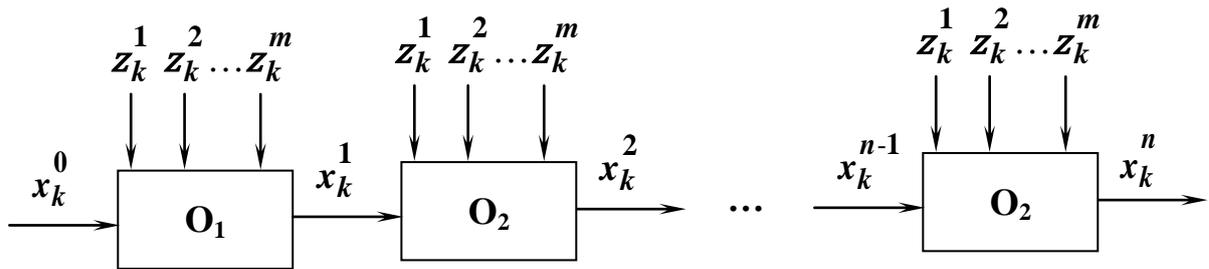


Рис. 20. Структурная схема ТП: $x_k^0, x_k^1, \dots, x_k^n$ – значения k -го контролируемого параметра для исходной заготовки, первой O_1 , ..., последней O_n операций; $z_k^1, z_k^2, \dots, z_k^m$ – влияющие величины для k -го контролируемого параметра

Расчет надежности новых ТП следует производить с учетом технологической наследственности при формировании качества обрабатываемых деталей.

Технологической наследственностью называется явление переноса свойств объектов от предшествующих операций к последующим, обусловленное наличием технологических связей между ними.

С учетом технологической наследственности, если параметры качества не зависят друг от друга, вероятность выполнения задания на двух операциях по одному k -му параметру качества изготавливаемой продукции можно определить по формуле

$$P_k(t) = P_k^{(2)}(t) \cdot [1 - K_{нд}^{(1,2)} \cdot (1 - P_k^{(1)}(t))], \quad (78)$$

где $P_k^{(1)}$ и $P_k^{(2)}$ – вероятность выполнения задания по k -му контролируруемому параметру соответственно для первой и второй операций; $K_{\text{пд}}^{(1,2)}$ – коэффициент передачи дефекта с первой операции на вторую по k -му контролируемому параметру (табл. 12).

Коэффициент передачи дефекта $K_{\text{пд}}$ показывает, какая доля отказов по какому-либо контролируемому параметру с предшествующей операции переходит в отказы по соответствующему параметру после выполнения последующей операции.

12. Значения коэффициента передачи дефекта $K_{\text{пд}}$ для различных операций [5]

Характер операции		$K_{\text{пд}}$
предшествующей	последующей	
Получение технологических баз	Обработка от технологических баз	0,5 ... 0,9
Черновая обработка	Получистовая или чистовая обработка	0,03 ... 0,1
Получистовая обработка	Чистовая обработка	0,01 ... 0,2
Чистовая обработка	Отделочная обработка	0,1 ... 0,6
Подготовка поверхности под покрытие	Нанесение покрытия	0,5 ... 0,7

Оценку надежности ТС по выполнению заданий по параметрам качества изготавливаемой продукции выполняют расчетным и опытно-статистическим методами. Причем для действующего производства используются оба метода, а для вновь разрабатываемых ТП – только расчетный.

В общем случае вероятность выполнения задания ТС операции по k -му параметру качества изготавливаемой продукции в фиксированный момент времени t определяется по формуле

$$P_k(t) = \int_{x_{\text{н}}}^{x_{\text{в}}} f(x_k) \cdot dx_k, \quad (79)$$

где $f(x_k)$ – плотность распределения i -го параметра в момент времени t ; $x_{\text{в}}$ и $x_{\text{н}}$ – соответственно наибольшее и наименьшее предельные значения контролируемого параметра.

Если контролируемый параметр распределен по нормальному закону

$$P_k(t) = \Phi_0\left(\frac{x_{\text{в}} - \bar{x}}{\sigma}\right) - \Phi_0\left(\frac{x_{\text{н}} - \bar{x}}{\sigma}\right). \quad (80)$$

При задании односторонних границ

$$P_k(t) = P(x_i \leq x_B) = 0,5 + \Phi_0\left(\frac{x_B - \bar{x}}{\sigma}\right); \quad (81)$$

или

$$P_k(t) = P(x_i \geq x_H) = 0,5 + \Phi_0\left(\frac{\bar{x} - x_H}{\sigma}\right). \quad (82)$$

Значения функции $\Phi_0(z)$ определяют по прил. 1 (табл. П 1.1).

Средние значения \bar{x} и СКО σ для действующего производства определяют по формулам (71) и (72), полученным на основе опытно-статистической обработки мгновенной выборки.

Нормальное распределение имеет место, как правило, у параметров качества, определяющих точность диаметральных и линейных размеров, полученных после обработки заготовок резанием, если погрешность настройки существенно меньше допуска.

В этом случае для проектируемого ТП за \bar{x} и σ в формулах (80)–(82) принимают значения:

$$\bar{x} = m_x(t) + m_0; \quad (83)$$

$$\sigma = \sqrt{[\sigma_x(t)]^2 + \sigma_0^2}, \quad (84)$$

где $m_x(t)$ и $\sigma_x(t)$ – математическое ожидание и СКО мгновенной погрешности обработки (т.е. вычисленные для мгновенной выборки); m_0 и σ_0 – математическое ожидание и СКО погрешности настройки ТС.

За m_0 и σ_0 следует принимать, соответственно, начальные значения контролируемого параметра и его СКО.

Для укрупненных расчетов надежности проектируемых ТП можно принять значение \bar{x} равным середине поля допуска, а $\sigma = \omega/6$, где ω – производственная погрешность, определяемая по формуле (69).

Если известны или определены по результатам анализа точности действующего ТП функции смещения центра группирования размеров $m_x(t)$ и изменения мгновенной погрешности, определяемой через СКО $\sigma_x(t)$, вероятность выполнения задания ТС вычисляют по выражению

$$P(t) = \Phi_0\left(\frac{m_x(t) - x_H}{\sigma_x(t)}\right) + \Phi_0\left(\frac{x_B - m_x(t)}{\sigma_x(t)}\right). \quad (85)$$

Если математическое ожидание $m_x(t) = \Delta m \cdot t$ (Δm – скорость смещения центра группирования), а $\sigma_x(t) = \sigma_0 = \text{const}$, вероятность выполнения задания вычисляют по выражению

$$P(t) = \Phi_0\left(\frac{m_0 + \Delta m \cdot t - x_{\text{н}}}{\sigma_0}\right) + \Phi_0\left(\frac{x_{\text{в}} - m_0 - \Delta m \cdot t}{\sigma_0}\right). \quad (86)$$

Пример 12. Определить вероятность выполнения задания $P(t)$ по размеру $\varnothing 10h10_{(-0,058)}$ при точении вала на токарном автомате для момента времени $t = 5$ ч.

Известно, что смещение центра группирования подчиняется линейному закону $m_x(t) = m_0 + \Delta m \cdot t$, где $m_0 = 9,965$ мм – настроечный размер; $\Delta m = 0,005$ мм/ч – скорость смещения центра группирования.

Распределение размеров вала подчиняется нормальному закону с $\sigma_x(t) = \text{const} = \sigma_0 = 0,005$ мм.

1. Определяем наибольший $x_{\text{в}}$ и наименьший $x_{\text{н}}$ размеры вала: $x_{\text{в}} = 10,0$ мм; $x_{\text{н}} = 9,942$ мм.

2. Рассчитаем по формуле (86) вероятность выполнения задания для момента времени $t = 5$ ч, учитывая, что $\sigma_0 = 0,005$ мм и используя табл. П 1.1 (см. прил. 1) для определения функции Лапласа

$$\begin{aligned} P(t) &= \Phi_0\left(\frac{(m_0 + \Delta m \cdot t) - x_{\text{н}}}{\sigma_0}\right) + \Phi_0\left(\frac{x_{\text{в}} - (m_0 + \Delta m \cdot t)}{\sigma_0}\right) = \\ &= \Phi_0\left(\frac{(9,965 + (0,005 \cdot 5)) - 9,942}{0,005}\right) + \Phi_0\left(\frac{10,0 - (9,965 + 0,005 \cdot 5)}{0,005}\right) = \\ &= \Phi_0(9,6) + \Phi_0(2) = 0,5 + 0,4772 = 0,9772 \text{ или } P(t) = 97,7 \%. \end{aligned}$$

Пример 13. Определить вероятность выполнения задания $P(t)$ по отклонению формы (отклонению от круглости) цилиндрической поверхности вала на токарной операции 2 (чистовая обработка) с учетом передачи дефектов с операции 1 (получистовая обработка). Известно, что $P_1(t) = 0,96$; $P_2(t) = 0,95$.

1. По табл. 12 находим коэффициент передачи дефекта $K_{\text{пд}}^{(1,2)} = 0,2$.

2. Определяем по формуле (78) вероятность выполнения задания

$$P(t) = 0,95 \cdot [1 - 0,2 \cdot (1 - 0,96)] = 0,942 \text{ или } P(t) = 94,2 \%.$$

3.3.2. Опытнo-статистический метод

Согласно ГОСТ 27.002 оценку надежности ТС по выполнению задания (оценку вероятности выполнения задания) по одному (k -му) и одновременно по n параметрам качества опытнo-статистическим методом производят по результатам выборочного обследования N единиц изготовленной продукции по формуле

$$P_k(t) = 1 - \frac{d_k(t)}{N}, \quad (87)$$

где $d_k(t)$ – количество дефектных единиц продукции по k -му параметру качества.

Оценку дисперсии вероятности выполнения задания σ_p по k -му показателю качества производят по формуле

$$\sigma_p^2 = \frac{P_k(t) \cdot [1 - P_k(t)]}{N}, \quad (88)$$

где $P_k(t)$ – вероятность выполнения задания по k -му показателю качества, рассчитанная по формуле (87).

Если общее количество измеренных единиц продукции не превосходит 10 % от объема всей изготовленной за рассматриваемый промежуток времени продукции и значение искомого показателя надежности $P_k(t)$ не менее 0,9, доверительные границы вероятности выполнения задания по параметрам качества имеют вид

$$P_{\text{в}} = \begin{cases} 1 & \text{при } d = 0 \\ 1 - \frac{d}{N \cdot r_1} & \text{при } d \neq 0 \end{cases}, \quad (89)$$

$$P_{\text{н}} = \begin{cases} 1 - \frac{r_0}{N} & \text{при } d = 0 \\ 1 - \frac{d}{N \cdot r_2} & \text{при } d \neq 0 \end{cases}, \quad (90)$$

где $P_{\text{в}}$ и $P_{\text{н}}$ – верхняя и нижняя границы вероятности выполнения задания по рассматриваемому показателю качества; d – количество обнаруженных дефектных единиц продукции (по рассматриваемому показателю качества); r_0, r_1, r_2 – коэффициенты, определяемые по ГОСТ 27.002.

Пример 14. Определить вероятность выполнения задания сборочным участком по параметрам качества изготавливаемой продукции и ее доверительные границы при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$.

В результате проведения выборочного обследования сборочного участка из ста проверенных изделий восемь имели отклонения от установленных требований к качеству сборки, например, эксплуатационные характеристики изделий не соответствовали нормативной документации.

1. Определяем по формуле (87) вероятность выполнения задания по параметрам качества

$$P(t) = 1 - \frac{8}{100} = 0,92.$$

2. Определяем дисперсию величины $P_k(t)$ по формуле (88)

$$\sigma_p^2 = \frac{0,92 \cdot 0,08}{100} = 0,00736.$$

3. Определяем доверительные границы P_B и P_H по формулам (89) и (90) при доверительной вероятности $\gamma = 0,95$; $r_1 = 2,01$ и $r_2 = 0,55$ (см. табл. П 1.5, прил. 1)

$$P_B = 1 - \frac{8}{100 \cdot 2,01} = 0,959,$$

$$P_H = 1 - \frac{8}{100 \cdot 0,55} = 0,856.$$

Таким образом, вероятность выполнения задания сборочным участком по параметрам качества сборки составляет $P = 0,92$ при доверительных границах от $P_H = 0,856$ до $P_B = 0,959$ и доверительной вероятности $\gamma = 0,95$.

Контрольные вопросы

1. Назовите три группы параметров, определяющих надежность ТС.
2. Перечислите методы, используемые для оценки надежности ТС по параметрам качества изготавливаемой продукции.
3. Назовите основные показатели, используемые для оценки надежности ТС по параметрам точности.
4. Приведите условия надежности ТС.
5. В чем заключается расчетный метод определения показателей точности ТС?

6. В чем заключается опытно-статистический метод определения параметров точности ТС?

7. Назовите области применения оценки надежности ТС по параметрам точности методом квалитетов.

8. Дайте определение термину «технологическая наследственность».

9. В чем заключается расчетный метод оценки надежности ТС по выполнению задания по параметрам качества изготавливаемой продукции?

10. Что определяет «коэффициент передачи дефекта»?

11. В чем заключается опытно-статистический метод оценки надежности ТС по выполнению задания по параметрам качества изготавливаемой продукции?

12. Приведите формулы для расчета коэффициентов точности и смещения.

4. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Составной частью любого ТП является измерительный процесс. От качества измерительного процесса зависит правильность принимаемых решений по управлению ТП и о соответствии выпускаемой продукции.

Измерительный процесс – процесс, преобразующий значение измеряемого параметра в результат измерения посредством использования ресурсов (средств измерительной техники и другого оборудования, оператора, окружающей среды и т.д.), регулируемый методикой выполнения измерения. По существу, измерительный процесс представляет собой взаимодействие людей, оборудования, изделия, методов и среды, в результате которого происходит измерение. В простейшем случае модель измерительного процесса можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 21.

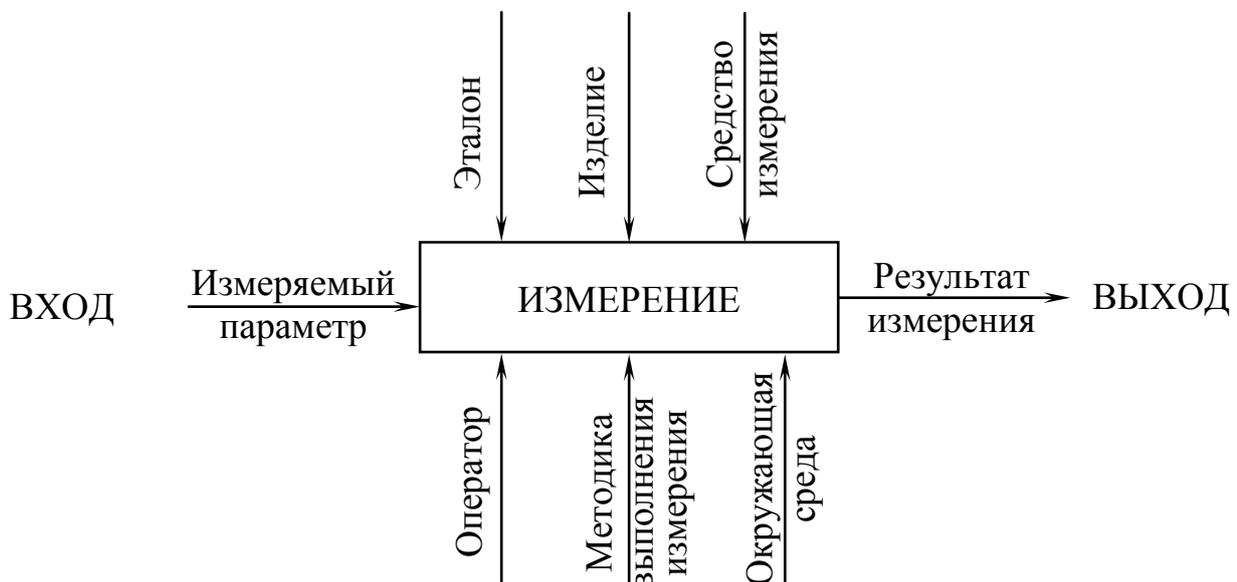


Рис. 21. Модель измерительного процесса

4.1. Показатели качества измерительных процессов

Качество измерительного процесса связано со статистическими характеристиками многократных измерений и определяется точностью и достоверностью измерений (рис. 22). **Точность измерений** является характеристикой качества измерений, отражающей близость к нулю погрешности его результата. Для описания точности измерений в ГОСТ Р ИСО 5725.1 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений» используют два термина: правильность и прецизионность.

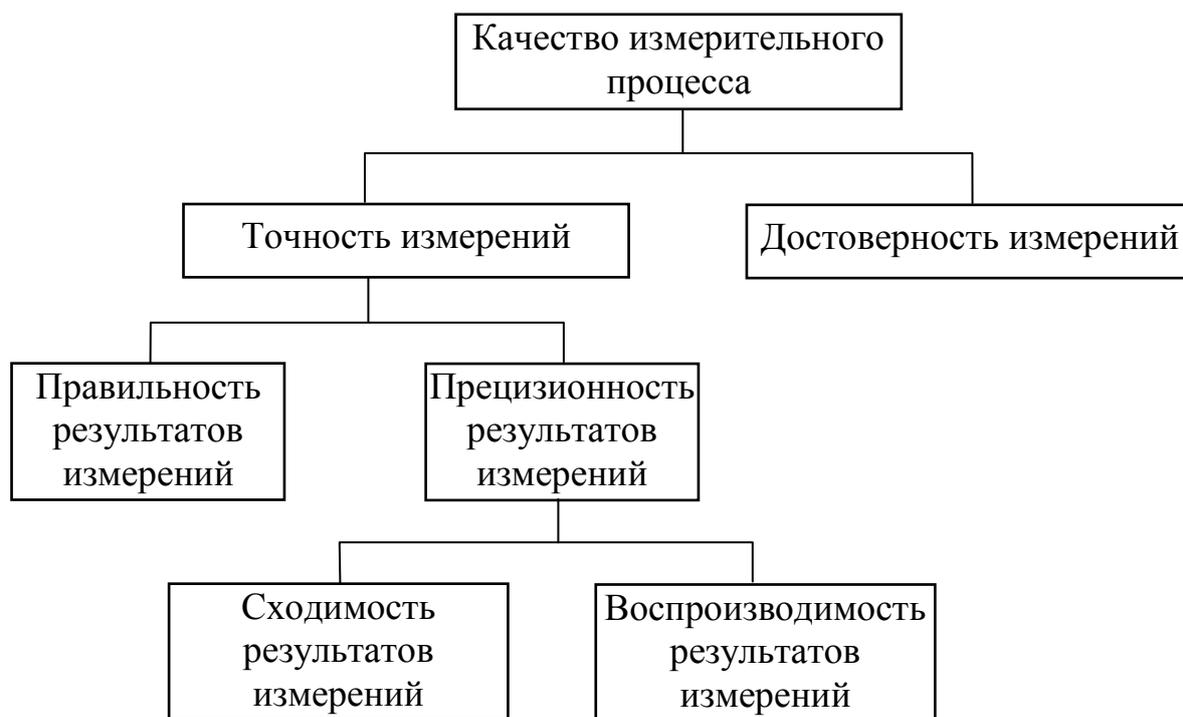


Рис. 22. Показатели качества измерительного процесса

Термин *правильность* характеризует степень близости среднего арифметического значения большого числа результатов измерений к истинному значению и оценивается *смещением* среднего арифметического значения при многократных измерениях физической величины от истинного значения.

Показателем правильности измерений является значение систематической погрешности, которая обусловлена несовершенством реализации принятого метода измерений, погрешностью градуировки применяемого средства измерения (СИ), отклонением условий измерения от нормальных и др.

Абсолютное значение смещения среднего арифметического значения измеряемой величины (рис. 23) можно рассчитать по формуле

$$B = \bar{x} - x_{и}, \quad (91)$$

где B – смещение среднего арифметического значения; \bar{x} – среднее арифметическое значение измеряемой величины; $x_{и}$ – истинное значение измеряемой величины.

Если абсолютное значение смещения известно и постоянно, то в результате измерений вносят соответствующую поправку со знаком, противоположным этому смещению.

Определить значение смещения среднего арифметического значения измеряемой величины возможно только тогда, когда можно прямо или косвенно определить ее истинное значение. Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, то, как в отечественной, так и в международной практике [1], его заменяют опорным значением. В соответствии с ГОСТ Р 51814.5 «Система

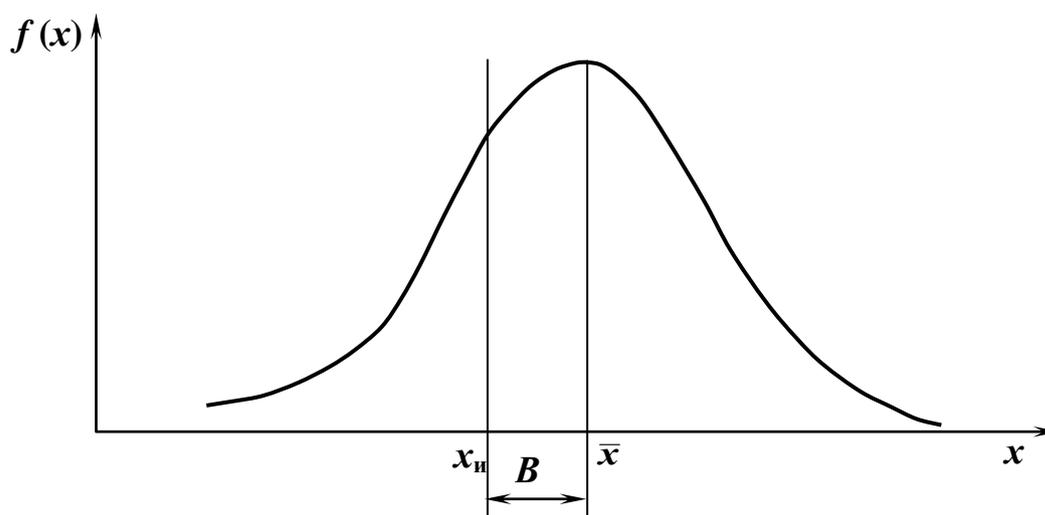


Рис. 23. Смещение среднего арифметического значения

менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов» **опорное значение** (предполагаемое истинное значение) – это среднее арифметическое значение, полученное при многократном измерении ($n \geq 20$) параметра образца (детали) в метрологической лаборатории с использованием СИ более высокой точности, чем СИ измерительного процесса. Образец, как правило, выбирают из числа деталей анализируемого технологического процесса, значение измеряемого параметра которого попадает в середину поля допуска.

Относительное смещение среднего арифметического значения измеряемой величины обозначают B_{SL} и рассчитывают по формуле

$$B_{SL} = \frac{|B|}{(USL - LSL)} \cdot 100\% = \frac{|B|}{IT} \cdot 100\%, \quad (92)$$

где IT – стандартный допуск, USL и LSL – соответственно верхняя и нижняя граница поля допуска.

Относительное смещение среднего арифметического значения измеряемой величины не должно превышать 10 %.

На результаты измерения влияют различные источники **изменчивости измерительных процессов**: несовершенство метода измерения, неидентичность измеряемых образцов, субъективные (зависящие от оператора) погрешности используемого оборудования, условия, в которых выполняются измерения и др. [8]. Поэтому при повторных измерениях одного и того же образца полученные результаты будут различны. Эти различия обусловлены обычными (случайными) и особыми (неслучайными) причинами. При естественном ходе процесса его изменчивость обычно обусловлена влиянием множества разнообразных неконтролируемых причин. Принято считать, что процесс находится в «статистически управляемом состоянии», если источником его изменчивости

являются только случайные причины, которые имеют стабильное и повторяемое распределение во времени. **Стабильность измерительного процесса** (статистически управляемое состояние) – состояние измерительного процесса, при котором удалены все особые (неслучайные) причины изменчивости, т.е. наблюдаемая изменчивость может быть объяснена системой обычных (случайных) причин.

Измерительный процесс, находящийся в статистически управляемом состоянии характеризуется тем, что ход процесса предсказуем, смещение среднего арифметического значения измеряемой величины либо отсутствует (рис. 24, а), либо имеет постоянное значение во времени, и разброс значений измеряемой величины находится в прогнозируемых пределах.

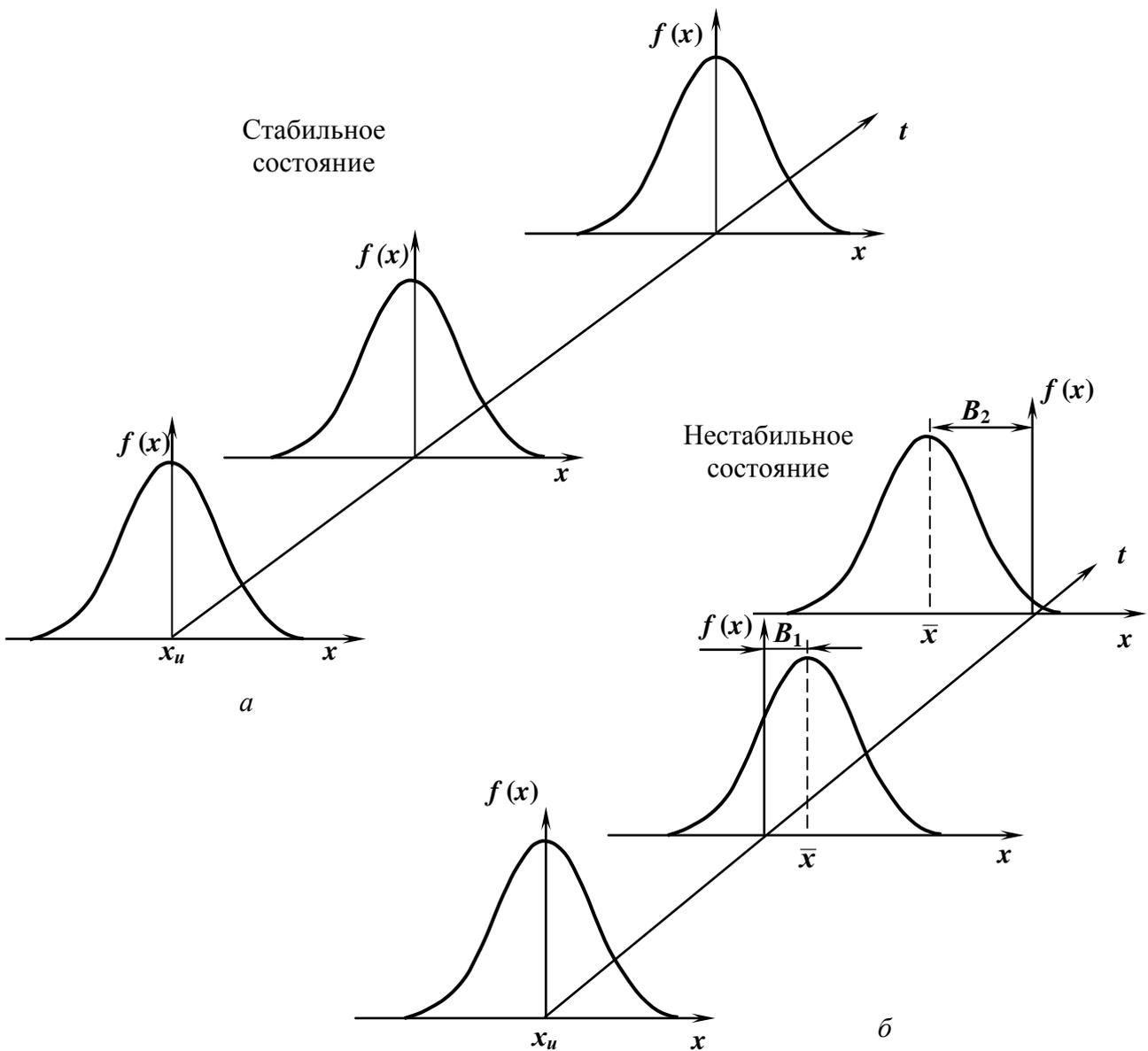


Рис. 24. Стабильность измерительного процесса

При воздействии на измерительный процесс неслучайных (особых) причин изменчивости (например, отклонение температуры окружающей среды от нормальной), он выходит из статистически управляемого состояния, ход процесса становится непредсказуемым, результаты измерений могут существенно отклоняться от прогнозируемых, а разброс результатов измерений может оказаться неприемлемым (см. рис. 24, б).

На практике представляется исключительно важным поддерживать измерительный процесс в стабильном статистически управляемом состоянии, для чего используют методы статистического управления процессами. Простым и эффективным средством статистического управления измерительными и технологическими процессами являются контрольные карты, которые отражают текущее состояние процесса, дают возможность производить оценку степени изменчивости процесса, определять наличие статистической управляемости и оказывают помощь в достижении такой управляемости [3, 6]. Принципы построения, ведения и применения различных видов контрольных карт для анализа стабильности и оценки возможности управления процессами приведены в ГОСТ Р 50779.42 «Статистические методы. Контрольные карты Шухарта».

Прецизионность результатов измерений – степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях. Прецизионность зависит только от случайных погрешностей и не имеет отношения к истинному значению измеряемой величины. Прецизионность является общим термином для выражения изменчивости повторяющихся измерений и включает в себя сходимость и воспроизводимость результатов измерений.

Сходимость результатов измерений (сходимость измерений) – это близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью (рис. 25).

Необходимость рассмотрения сходимости возникает из-за того, что измерения, выполняемые на предположительно идентичных изделиях при предположительно идентичных условиях, не дают, как правило, идентичных результатов. Это объясняется неизбежными случайными погрешностями, присущими каждому измерительному процессу, а разброс результатов измерений может оказаться неприемлемым. Сходимость результатов измерений оценивается средней квадратической погрешностью результатов измерений [8]. Обычно сходимость обозначают как изменчивость оборудования – *EV* (*Equipment Variation*).

Воспроизводимость результатов измерений (воспроизводимость измерений) – это близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в различных местах, разными методами, разными средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям измерений (температуре, давлению, влажности и др.) (см. рис. 25).

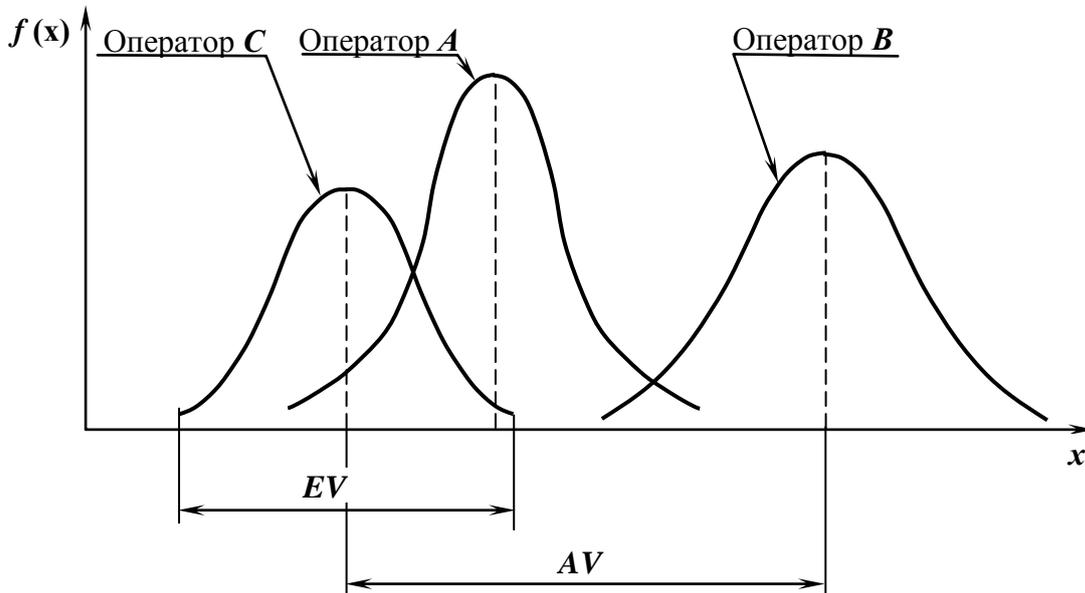


Рис. 25. Сходимость и воспроизводимость результатов измерений

Воспроизводимость, также как и сходимость, количественно может быть выражена средней квадратической погрешностью результата измерения. Воспроизводимость обозначают как изменчивость, вносимую оператором, – AV (*Appraiser Variation*).

Сходимость и воспроизводимость представляют собой два крайних случая прецизионности, где первый характеризует минимальную, а второй – максимальную изменчивость результатов [1].

Достоверность измерений определяется степенью доверия к результату измерения и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах интервала результата измерений

$$P = P\{(\bar{x} - \Delta) \leq x \leq (\bar{x} + \Delta)\},$$

где Δ – погрешность измерения.

Как следует из анализа погрешностей, достоверность измерений – это близость к нулю случайной или (и) неисключенной систематической погрешности.

Рассмотренные показатели качества применяют в международной практике для анализа приемлемости измерительных процессов, используемых для контроля качества выпускаемой продукции и управления ТП, а также для подтверждения или признания компетентности испытательных лабораторий, заказчиками и органами по аккредитации.

4.2. Методика проведения анализа качества измерительного процесса

4.2.1. Общие положения

Целью анализа является получение заключения о приемлемости измерительного процесса при изготовлении продукции заданного качества.

Анализ измерительных процессов проводят на основании статистических исследований, заключающихся в многократном измерении параметров качества детали различными операторами.

Перед проведением исследования измерительного процесса все СИ, используемые в измерительном процессе, должны пройти поверку (калибровку).

Разрешающая способность средств измерительной техники должна быть равной, по крайней мере, одной десятой ожидаемой изменчивости характеристики процесса (допуска на измеряемый параметр).

При снятии показаний оборудования результаты измерений следует округлять до ближайшего числа, которое может быть получено. Например, если цена деления 0,1, то результат следует округлять до 0,05.

При округлении составляющих погрешности измерения оставляют одну значимую цифру, если она больше трех (например, оценку СКО $S_x = 0,523$ округляют до $S_x = 0,5$) и две – если первая из них меньше четырех (например, $S_x = 0,253$ округляют до $S_x = 0,25$). Округление составляющих погрешности измерения производят лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним или двумя лишними знаками.

Измеряемые образцы должны:

- отбираться из значительного цикла производства;
- наиболее полно представлять весь существующий диапазон изменчивости контролируемого параметра.

При выборе операторов, участвующих в измерительном процессе, следует, по возможности, привлекать как операторов, имеющих большой стаж работы, так и новых операторов, чтобы при исследованиях получить наибольшую изменчивость результатов измерений разными операторами.

В соответствии с ГОСТ Р 51814.5 анализ качества измерительных процессов, входящих в состав ТП, производят в следующей последовательности (рис. 26):

- исследуют измерительный процесс на стабильность;
- в случае нестабильного измерительного процесса – устраняют особые причины изменчивости;
- оценивают смещение измерительного процесса;
- оценивают сходимость и воспроизводимость результатов измерений;

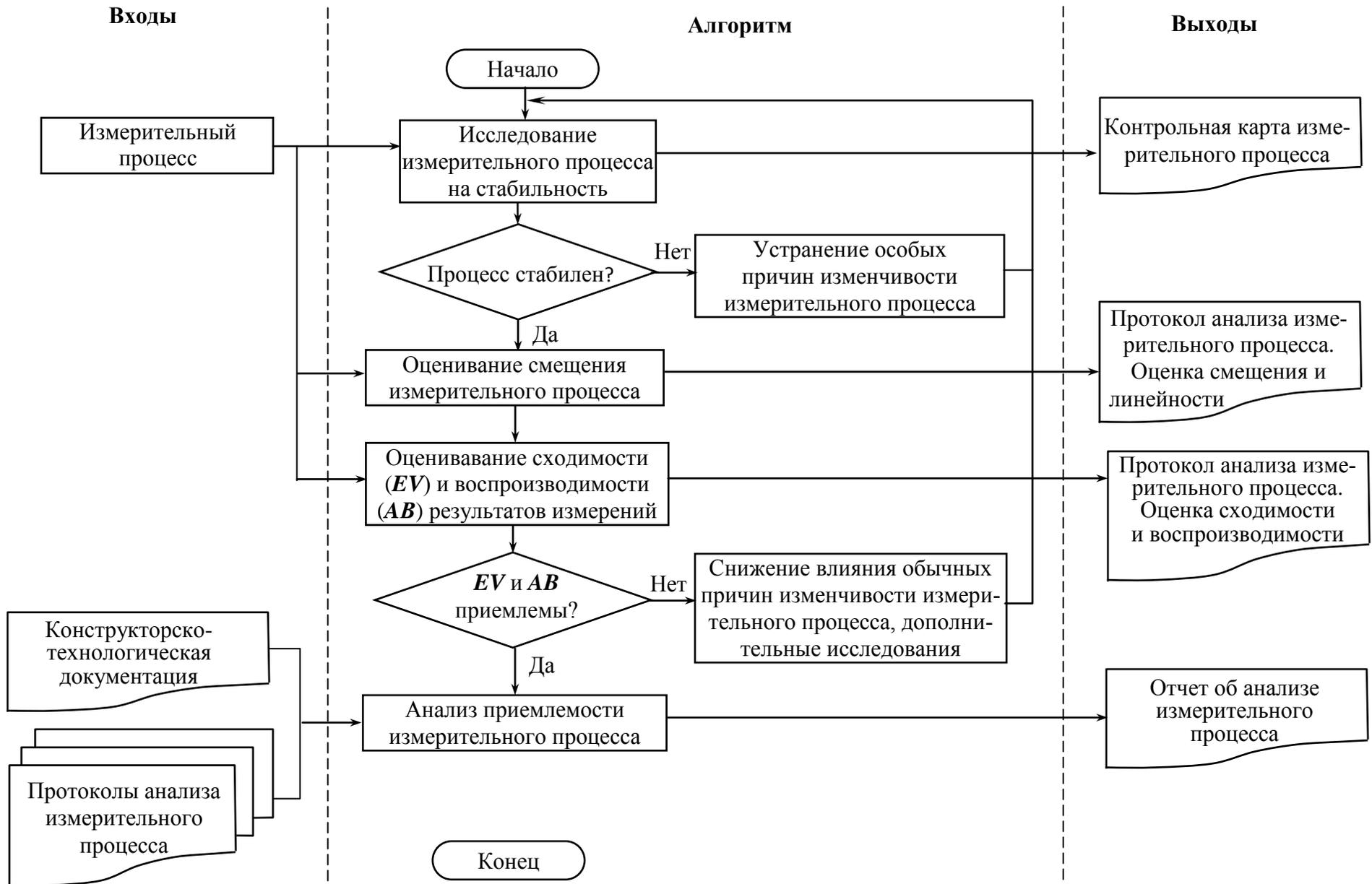


Рис. 26. Схема оценивания статистических характеристик измерительного процесса

– в случае неприемлемых сходимости и воспроизводимости результатов измерений – анализируют причины повышенной изменчивости, проводят корректирующие действия, повторно оценивают сходимость и воспроизводимость.

Подтверждение статистических характеристик измерительных процессов рекомендуется осуществлять не реже одного раза в год. Внеочередное подтверждение статистических характеристик выполняют в случаях: замены, модернизации или ремонта средств измерительной техники; изменения ТП, увеличения количества несоответствий измеряемого параметра и т.д.

Для исследования измерительного процесса на стабильность применяют контрольные карты средних и размахов по ГОСТ Р 50779.42 «Статистические методы. Контрольные карты Шухарта».

Измерительный процесс считают нестабильным, если присутствует хотя бы одна из следующих ситуаций (рис. 27):

– одна или несколько точек находятся за пределами контрольных границ (рис. 27, а);

– присутствуют серии точек: семь точек подряд находятся по одну сторону от среднего значения (рис. 27, б) или семь точек подряд последовательно возрастают или убывают;

– процесс проявляет другие признаки неслучайного поведения (например, большинство точек группируется около линии среднего либо около контрольных границ и т.д.).

В случае стабильности процесса проводят дальнейшие исследования измерительного процесса – оценивают смещение среднего арифметического значения измеряемой величины. Оценивают по формулам (91) и (92) абсолютное и относительное смещение и если относительное смещение не превышает 10 %, измерительный процесс считают приемлемым.

Для оценивания сходимости и воспроизводимости измерительного процесса используют три метода [1]: метод размахов, метод средних и метод дисперсий.

При выборе метода для оценивания сходимости и воспроизводимости измерительного процесса следует учитывать, что метод дисперсий является самым точным из представленных, однако, достаточно сложен для вычисления вручную. Метод размахов самый простой для расчетов, однако, не дает возможности получить полную картину изменчивости измерительного процесса и рекомендуется к применению только в условиях ограниченных временных ресурсов. Наиболее часто в практике используется метод средних и размахов.

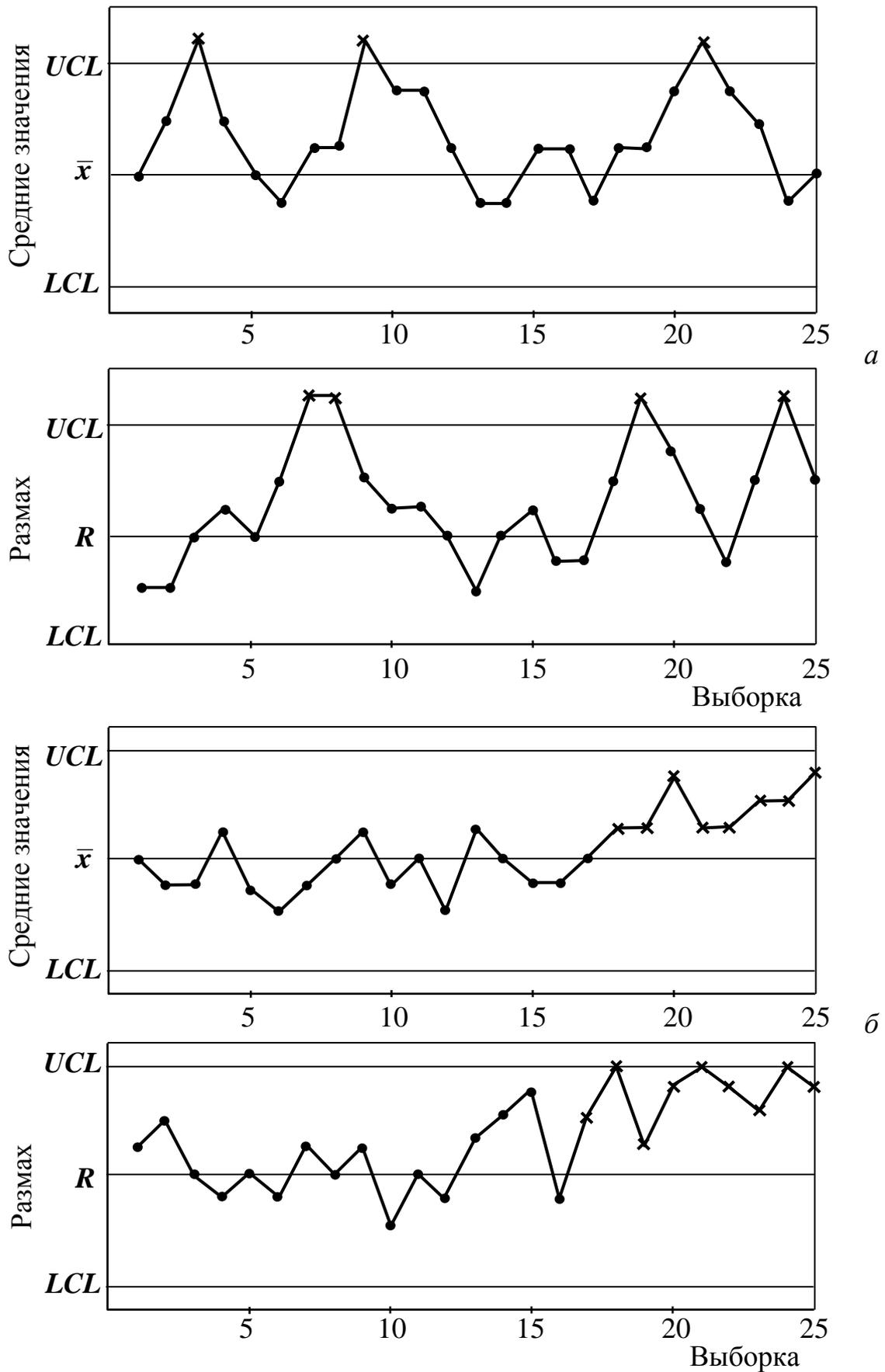


Рис. 27. Контрольные карты средних и размахов (\bar{x} , R – карты):
a – несколько точек находятся за пределами контрольных границ (UCL и LCL – соответственно верхняя и нижняя контрольные границы);
б – более семи точек находятся по одну сторону от среднего

4.2.2. Расчет сходимости и воспроизводимости измерительного процесса методом средних и размахов

Изменчивость какой-либо составляющей измерительного процесса определяют как доверительный интервал при уровне значимости γ (рекомендуется $\gamma = 0,99$) для истинного значения измеряемого параметра образца, то есть, если x – результат измерения параметра образца, то истинное значение измеряемого параметра с вероятностью γ будет лежать в интервале

$$\left(x - \frac{K_\gamma \cdot S_*}{2}; x + \frac{K_\gamma \cdot S_*}{2} \right), \quad (93)$$

где K_γ – параметр, определяемый исходя из уровня значимости α и таблицы значений функции Лапласа, приведенной в табл. П 1.1 (прил. 1). Для рекомендуемого уровня значимости $\gamma = 0,99$ значение $K_\gamma = 5,15$; S_* – СКО анализируемой составляющей изменчивости измерительного процесса для заданного уровня значимости γ .

Сходимость EV результатов измерений рассчитывают по формуле

$$EV = K_\gamma \cdot S_e, \quad (94)$$

где S_e – оценка СКО сходимости результатов измерений.

Воспроизводимость AV результатов измерений рассчитывают по формуле

$$AV = K_\gamma \cdot S_o, \quad (95)$$

где S_o – оценка СКО воспроизводимости результатов измерений.

Оценку СКО сходимости результатов измерений S_e определяют по формуле

$$S_e = \frac{\overline{R}}{D_2}, \quad (96)$$

где \overline{R} – средний размах всех измерений; D_2 – константа для вычисления СКО с помощью размаха. Таблица значений константы D_2 приведена в прил. 1. При выборе константы D_2 для расчета сходимости принимают $H = Q$ и $G = M \cdot N$ (Q – число измерений каждого образца; M – число операторов; N – число образцов) (табл. П 1.3, прил. 1).

Оценку СКО воспроизводимости результатов измерений определяют по формуле

$$S_o = \sqrt{\left[\frac{R_o}{D_2}\right]^2 - \left[\frac{S_e^2}{NQ}\right]^2}, \quad (97)$$

где R_o – размах между измерениями, выполняемыми различными операторами. При выборе константы D_2 для расчета воспроизводимости принимают $H = M$ и $G = 1$ (см. табл. П 1.3, прил. 1).

Если под радикалом окажется отрицательное число, принимают $S_o = 0$.

Изменчивость PV образцов (объектов измерения) измерительного процесса рассчитывают по формуле

$$PV = K_\gamma \cdot S_p, \quad (98)$$

где S_p – оценка СКО изменчивости контролируемого параметра образца.

Оценку СКО изменчивости образца измерительного S_p процесса рассчитывают по формуле

$$S_p = \frac{R_p}{D_2}, \quad (99)$$

где R_p – размах значений контролируемого параметра образца. При выборе константы D_2 для вычисления изменчивости образца принимают $H = N$ и $G = 1$ (см. табл. П 1.3, прил. 1).

Сходимость и воспроизводимость $R\&R$ результатов измерений рассчитывают по формуле

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2}. \quad (100)$$

Полную изменчивость TV измерительного процесса рассчитывают по формуле

$$TV = \sqrt{R\&R^2 + PV^2}. \quad (101)$$

4.2.3. Оценивание приемлемости измерительного процесса

Оценка приемлемости измерительного процесса заключается в сравнении его сходимости и воспроизводимости с допуском или полной изменчивостью измеряемого параметра образца.

Приемлемость измерительного процесса, применяемую для оценки соответствия измеряемого параметра образца допуску на него, определяют исходя из анализа величины относительной сходимости и воспроизводимости $R\&R_{SL}$, рассчитываемой по формуле

$$R \& R_{SL} = \frac{R \& R}{USL - LSL} \cdot 100\%. \quad (102)$$

На основании величины относительной сходимости и воспроизводимости $R \& R_{SL}$ и в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 13, специалист делает выводы о приемлемости измерительного процесса для оценки соответствия допуску.

Приемлемость измерительной системы для целей регулировки или измерения изменчивости процесса оценивают аналогично анализу приемлемости измерительного процесса для оценки соответствия допуску. Однако вместо $R \& R_{SL}$ рассматривают $R \& R_{TV}$, полученную как отношение сходимости и воспроизводимости к величине полной изменчивости измерительного процесса по формуле

$$R \& R_{TV} = \frac{R \& R}{TV} \cdot 100\%. \quad (103)$$

13. Рекомендации о приемлемости измерительного процесса

Значение $R \& R_{SL}$, %	Вывод о приемлемости измерительного процесса
Менее 10	Измерительный процесс приемлем для оценки соответствия допуску
От 10 до 30	Измерительный процесс может быть приемлем в зависимости от важности применения, стоимости средств измерительной техники и т. п.
Более 30	Требуются улучшения измерительного процесса

Для более полного анализа измерительного процесса вычисляют относительные значения составляющих изменчивости (сходимость, воспроизводимость, изменчивость образца) по формулам:

$$EV_{TV} = \frac{EV}{TV} \cdot 100\%, \quad (104)$$

$$AV_{TV} = \frac{AV}{TV} \cdot 100\%, \quad (105)$$

$$PV_{TV} = \frac{PV}{TV} \cdot 100\%. \quad (106)$$

При подстановке в формулы (104) – (106) вместо полной изменчивости TV измерительного процесса величины допуска $USL - LSL$ получают относительную изменчивость составляющих процесса относительно допуска.

Для определения приоритетных путей снижения изменчивости измерительного процесса относительные значения составляющих изменчивости ранжируют по убыванию. Полученная очередность составляющих изменчивости соответствует очередности применения к ним мероприятий, направленных на устранение следующих причин, обусловленных действием различных факторов (рис. 28):

- несоответствия измеряемых образцов;
- погрешностей операторов;
- несовершенства методов измерения;
- несоответствия СИ;
- несоответствия окружающей среды.

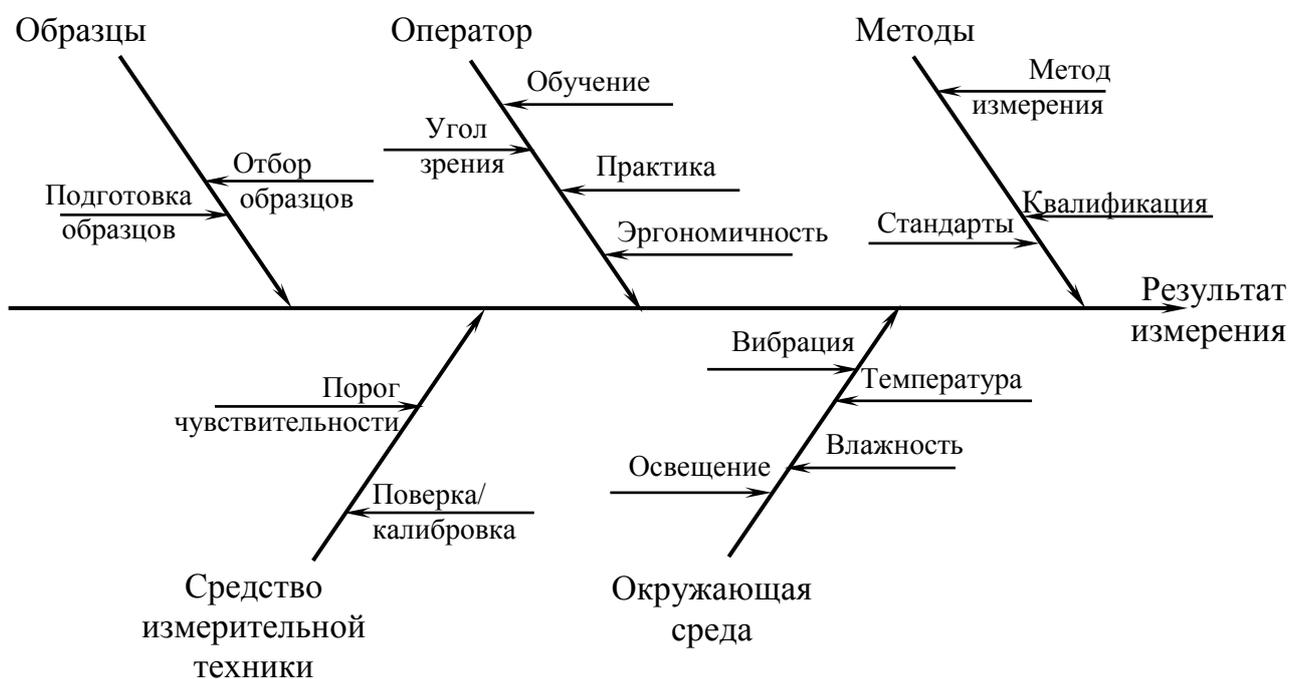


Рис. 28. Факторы, влияющие на изменчивость измерительного процесса по ГОСТ Р 51814.5

При неприемлемом значении смещения измерительного процесса причинами могут быть:

- несоответствие измеренных значений контролируемого параметра образца полю допуска;
- износ элементов СИ;
- некорректная настройка СИ;
- некорректная поверка или калибровка СИ;
- неправильное применение методики измерений оператором;
- неверная методика обслуживания и ремонта СИ.

При неприемлемом значении сходимости результатов измерений возможными причинами могут быть:

- несвоевременное техническое обслуживание, ремонт или модернизация средств измерительной техники;
- повышенная изменчивость измеряемых параметров образцов.

Неприемлемое значение воспроизводимости результатов измерений обусловлено следующими причинами:

- недостаточный порог чувствительности СИ;
- недостаточная квалификация (подготовка) операторов;
- отсутствие необходимых специальных приспособлений для операторов.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение измерительного процесса.
2. По каким показателям оценивают качество измерительного процесса?
3. Что характеризует термин «правильность измерений»?
4. Дайте определение стабильности измерительного процесса.
5. Дайте определение прецизионности результатов измерений.
6. Дайте определение сходимости и воспроизводимости результатов измерений.
7. Как количественно можно оценить сходимость и воспроизводимость результатов измерений?
8. Назовите цель анализа качества измерительного процесса.
9. Приведите последовательность анализа качества результатов измерений.
10. Назовите методы оценивания сходимости и воспроизводимости измерительного процесса.
11. Приведите рекомендации о приемлемости измерительного процесса.

5. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № 1

Исследование влияния технологической подготовки поверхностей на износостойкость и показатели надежности деталей машин

Цель работы: Освоение расчетно-экспериментального метода определения параметров надежности деталей, обработанных различными технологическими методами по критерию износостойкости.

Задание: С помощью профилографа-профилометра записать профилограммы поверхностей деталей, обработанных различными методами (шлифованием, точением, поверхностно-пластическим деформированием и т.п.), определить высотные параметры и параметры опорной поверхности и рассчитать интенсивность изнашивания, вероятность безотказной работы и долговечность этих деталей.

Перечень приборов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: профилограф-профилометр (мод. 201 или другой); персональные компьютеры с периферийными устройствами; исследуемые детали и их чертежи (выдает преподаватель).

Порядок выполнения работы

– Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.

– Записывают профилограммы поверхностей деталей, обработанных различными методами (профилограммы записывают в продольном и поперечном направлениях).

– По шкале профилографа-профилометра и из профилограммы находят параметры шероховатости Ra , $Rmax$, Rp , tm , tp . Профилограмму обрабатывают по методике МИ 41-88 «ГСИ. Методика выполнения измерений параметров шероховатости поверхностей по ГОСТ 2789-73 при помощи приборов профильного метода».

– По формулам (50) и (51), (54) – (57) определяют параметры опорной кривой ν и b , приведенный радиус неровностей r и безразмерный показатель Δ . Значение параметров шероховатости заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 14.

– По формулам (52) и (53) определяют коэффициенты K_2 и K_3 .

– Находят по табл. П 2.1 и П 2.2 (см. прил. 2) физико-механические и фрикционные характеристики деталей E , σ_0 , tm , ty , k , α_r и τ_0 для заданных условий эксплуатации.

- По номограмме (см. рис. 15) определяют коэффициент K_{tv} .
- По табл. П 3.1 (см. прил. 3) определяют ориентировочные значения параметров волнистости поверхности W_z и R_w .
- По формулам (46), (47) или (48) определяют интенсивность изнашивания. Результаты расчета заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 14.
- По формуле (44) определяют скорость изнашивания V_u и по формуле (58) технический ресурс детали t_{pu} по критерию износа. Результаты расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 13. Намечают пути повышения технического ресурса.
- По формуле (61) находят квантиль u_p для заданных предельного износа $U_{пред}$ и технического ресурса t_{pu} . По квантилю с помощью табл. П 1.1 (см. прил. 1) определяют вероятность безотказной работы детали. Результаты расчета заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 15.
- Из уравнения (62) для заданной вероятности безотказной работы $P(t)$ находят гамма-процентный ресурс t_γ детали. Результаты расчета заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 15. Сравнивают полученные значения с нормативными данными на деталь (нормативные значения выдает преподаватель) и делают вывод о ее надежности.

14. Результаты измерения параметров шероховатости поверхностей трения, расчетов интенсивности изнашивания и технического ресурса

Наименование узла трения	Параметры шероховатости поверхностей трения						Интенсивность изнашивания I	Предельный износ, $U_{пред}$, мкм	Скорость относительного скольжения v , м/ч	Скорость изнашивания V_u , мкм/ч	Технический ресурс t_{pu} , ч
	Ra , мкм	$Rmax$, мкм	r , мкм	v	b	Δ					

15. Результаты расчета вероятности безотказной работы и гамма-процентного ресурса

Наименование узла трения	Предельный износ, $U_{пред}$, мкм	Скорость изнашивания V_u , мкм/ч	Отклонение среднего размера Δa , мкм	Наработка изделия t , ч	Вероятность безотказной работы $P(t)$, %	Гамма-процентный ресурс t_γ , ч

Лабораторная работа № 2

Исследование надежности ТС по параметрам качества изготавливаемой продукции

Цель работы: изучение методики оценки надежности ТС действующего и проектируемого ТП изготовления деталей по параметрам качества.

Задание: определить параметры точности и надежность ТС действующего и вновь проектируемого ТП изготовления детали и дать заключение о возможности использования рассматриваемых ТП для изготовления детали с определенными параметрами качества.

Перечень инструментов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: микрометры гладкие МК25-1 и МК50-1, микрометры рычажные МР25 и МР50, измеряемые детали, чертеж детали и маршрутный ТП изготовления детали (выдает преподаватель).

Порядок выполнения работы

- Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.
- Изучают чертеж детали и технологическую документацию на ее изготовление.
- Выбирают контролируемый параметр из наиболее ответственных параметров качества детали, по которому наиболее вероятно образование брака (по рекомендации преподавателя). Характеристику параметра качества (x_B , x_H , T и x_0) заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 16.
- Производят измерения выборочных значений контролируемого параметра у 25 ... 30 деталей для каждой операции, где изменяется этот параметр.
- По формулам (70) – (73) вычисляют среднее арифметическое значение \bar{x} и среднее квадратическое отклонение S_x контролируемого параметра.
- Исключают грубые погрешности (см. методику, изложенную в пособии [8]).
- После исключения грубых погрешностей повторно вычисляют \bar{x} и S_x . Результаты вычислений заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 16.
- Строят гистограммы изменения контролируемого параметра для каждой операции (см. методику, изложенную в пособии [8]).
- По формуле (64) определяют поле рассеяния и по формуле (74) – доверительный интервал $I_{\bar{x}}$. Результаты заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 16.

– По формулам (63) – (65) определяют коэффициент точности K_T и коэффициент смещения K_c (результаты расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 16).

– По формуле (67) проверяют условия надежности ТС для каждой операции ТП. Дают заключение о надежности ТС по параметрам точности ТП. При низкой надежности ТС разрабатывают мероприятия по ее повышению.

– Разрабатывают новый (проектный) вариант маршрута механической обработки детали.

– Для проектируемого ТП для каждой операции по формуле (69) определяют производственную погрешность ω по контролируемому параметру и коэффициент точности K_T (по формуле (63)). Результаты заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 16.

– Дают заключение о надежности ТС проектируемого ТП изготовления детали по принятому контролируемому параметру точности.

– Вычисляют для ТС каждой операции ТП вероятность выполнения задания $P(t)$ по параметрам качества изготавливаемой продукции (если контролируемый параметр распределен по нормальному закону по формулам (80) – (82), в противном случае по ГОСТ 27.202). Результаты заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 17.

– По табл. 12 определяют коэффициенты передачи дефекта по контролируемому параметру $K_{цд}$ для операций проектируемого ТП. Данные заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 17.

– Определяют вероятность выполнения задания ТС: для действующего ТП по формуле (77), для ТС проектируемого ТП по формуле (78). Результаты заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 17.

– Дают заключение о надежности ТС по параметрам качества изготавливаемой продукции для действующего и проектируемого ТП изготовления детали.

16. Результаты анализа параметров точности ТП

Технологический процесс	Номер и наименование операции	Контролируемый параметр, мм				Результаты измерения контролируемого, мм		Поле рассеяния ω^* , мм	Доверительный интервал $I_{\bar{x}}$, мм	Коэффициент точности K_T	Коэффициент смещения K_c	
		обозначение, x	предельные значения		Допуск T	Средина поля допуска x_0	\bar{x}					S_x
			$x_в$	$x_н$								
Действующий												
Проектируемый												
* Для проектируемого ТП принимают по справочным данным [16 и др.].												

17. Результаты оценки надежности ТС по параметрам качества

Технологический процесс	Операция		Контролируемый параметр x , мм	Вероятность безотказной работы ТС операции $P(t)$	Коэффициент передачи дефекта $K_{пд}$	Вероятность безотказной работы ТС ТП $P(t)$	Заключение
	номер	наименование					
Действующий					—		
					—		
					—		
Проектируемый							

Лабораторная работа № 3

Оценивание приемлемости измерительного процесса

Цель работы: изучение методики оценивания приемлемости измерительного процесса с использованием метода средних и размахов и апробация ее на конкретном примере.

Задание: оценить сходимость и воспроизводимость результатов измерений и полную изменчивость измерительного процесса методом средних и размахов. Дать заключение о приемлемости измерительного процесса при изготовлении продукции заданного качества.

Перечень инструментов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: микрометры гладкие МК25-1 и МК50-1, микрометры рычажные МР25 и МР50, скобы индикаторные типа СИ, стойка, объекты измерения (образцы) и их чертеж (выдает преподаватель).

Условие проведения эксперимента: преподаватель выдает студентам десять образцов, отобранных таким образом, чтобы они наиболее полно представляли весь существующий диапазон изменчивости контролируемого параметра при изготовлении детали.

Для проведения эксперимента преподаватель формирует группы операторов из трех студентов в каждой группе.

Порядок выполнения работы

– Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.

– Изучают чертеж объекта измерения. Устанавливают с помощью преподавателя контролируемый параметр.

– Изучают методику выполнения измерений контролируемого параметра (средство измерения и методику выполнения измерений с его помощью выдает преподаватель).

– Выполняют измерение образцов. Каждый из трех операторов поочередно измеряет контролируемый параметр десяти образцов, повторяя измерения по три раза. Результаты измерений заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 18.

По окончании эксперимента массив данных должен содержать Q повторных измерений (попыток) каждого из N образцов каждым из M операторов. Значение x_{ijk} – результат k -го измерения i -го образца j -м оператором. Таким образом i обозначает номер образца от 1 до N , индекс j – номер оператора от 1 до M (в табл. 18 операторы идентифицируются прописными буквами латинского алфавита A, B, C), k – номер измерения каждого образца каждым оператором.

18. Массив данных для оценки сходимости и воспроизводимости результатов измерений

Операторы и попытки		Порядковый номер образца										Средние и размахи
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A	1											
	2											
	3											
Среднее \bar{x}_{ij}												$\bar{x}_j =$
Размах R_{ij}												$\bar{R}_j =$
B	1											
	2											
	3											
Среднее \bar{x}_{ij}												$\bar{x}_j =$
Размах R_{ij}												$\bar{R}_j =$
C	1											
	2											
	3											
Среднее \bar{x}_{ij}												$\bar{x}_j =$
Размах R_{ij}												$\bar{R}_j =$
Среднее \bar{x}_i												$\bar{x} =$
Размах значений параметра образцов R_p												
Средний размах измерений $\bar{\bar{R}}$												
Размах между измерениями операторов R_o												

– Для каждого образца рассчитывают среднее значение результатов его измерений каждым оператором \bar{x}_{ij} и размах результатов его измерений каждым из операторов R_{ij} по формулам:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q x_{ijk}, \quad (107)$$

$$R_{ij} = x_{ijk}^{max} - x_{ijk}^{min}. \quad (108)$$

– Для каждого оператора рассчитывают среднее значение \bar{x}_j и средний размах \bar{R}_j результатов его измерений по формулам:

$$\bar{\bar{x}}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{x}_{ij}, \quad (109)$$

$$\bar{R}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ij}. \quad (110)$$

– Для каждого образца рассчитывают среднее значение $\bar{\bar{x}}_i$ результатов его измерений всеми операторами по формуле

$$\bar{\bar{x}}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \bar{x}_{ij}. \quad (111)$$

– Рассчитывают среднее значение \bar{x} и размах R_p результатов измерений образцов по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\bar{x}}_i, \quad (112)$$

$$R_p = \bar{\bar{x}}_i^{max} - \bar{\bar{x}}_i^{min}. \quad (113)$$

– Средний размах всех измерений $\bar{\bar{R}}$ рассчитывают по формуле

$$\bar{\bar{R}}_p = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \bar{R}_j. \quad (114)$$

– Размах между измерениями операторов R_0 рассчитывают по формуле

$$R_0 = \bar{\bar{x}}_j^{max} - \bar{\bar{x}}_j^{min}. \quad (115)$$

– Результат расчета средних и размахов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 18.

– По формулам (96) и (94) определяют оценки СКО S_e , S_0 и S_p , сходимость EV и воспроизводимость AV результатов измерений, а также изменчивость PV образцов (объектов измерения) измерительного процесса.

– Результаты расчетов СКО S_e , S_0 , S_p и составляющие изменчивости EV и AV заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 19.

– По формулам (100) и (101) определяют сходимость и воспроизводимость $R\&R$ и полную изменчивость TV измерительного процесса. Результаты расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 19.

– По формулам (102) – (106) оценивают приемлемость измерительного процесса путем сравнения его сходимости и воспроизводимости с допуском и

полной изменчивостью измеряемого параметра образца. Результаты оценки заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 19.

– Используя табл. 13, делают вывод о приемлемости измерительного процесса и выполняют анализ причин его изменчивости.

19. Протокол сходимости и воспроизводимости измерительного процесса

Составляющие изменчивости измерительного процесса	Оценка СКО	Значение составляющей изменчивости	Относительные значения составляющих изменчивости	
			относительно поля допуска	относительно полной изменчивости
Сходимость	S_e	EV	EV_{CL}	EV_{TV}
Воспроизводимость	S_o	AV	AV_{SL}	AV_{TV}
Сходимость и воспроизводимость	---	$R\&R$	$R\&R_{SL}$	$R\&R_{TV}$
Изменчивость параметра образца	S_p	PV	PV_{SL}	PV_{TV}
Полная изменчивость	---	TV	---	---
Вывод				

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

	Б		
Безотказность	16	Интенсивность отказа	23, 24, 33
			К
	В	Контрольные карты	92, 93
Вероятность		Коэффициент	
– безотказной работы	20, 21, 33, 63	– готовности	29
– выполнения задания	76, 79, 80, 82	– оперативной готовности	30
Волнистость поверхностей	43, 45, 56, 100	– передачи дефекта	77, 78
		– технического использования	29
	Г	– точности	69, 75
Готовность	11, 29	– смещения	70, 75
			Н
	Д	Надежность	7, 9, 10, 11, 67, 68, 69, 74, 101
Долговечность	16		
		Наклеп	
	И	– глубина	47, 48
Изделие		– степень	47, 48
– восстанавливаемое	10	Наработка до отказа	18, 22, 32
– невосстанавливаемое	10	Неисправность	13
Измерения	84		О
– достоверность	85, 89	Опорное значение	86
– правильность	84	Остаточные напряжения	48, 49
– точность	84	Отказ	14, 15, 16, 30, 32
Измерительный процесс	84, 91, 95, 96, 97, 104	– параметрический	14, 31
– изменчивость	86	– функциональный	14
– стабильность	87	Отклонения формы	
Изнашивание	53, 54	поверхностей	43, 45
– интенсивность	54, 55, 57, 59, 63, 101		
– скорость	54		П
Износ	52, 54, 55, 62	Параметр потока отказов	
– допускаемый	62	– мгновенный	25
– линейный	54	– средний	25
– предельный	61	Плотность распределения	
Износостойкость	55	наработки до отказа	23, 33, 36

Поверхностный слой	40	Сохраняемость	17
Повреждение	13	Срок службы	26
		Срок сохраняемости	
		– средний	28
		– гамма-процентный	28
Р			
Резервирование	12		
Релаксация остаточных напряжений	49	Т	
Ремонтопригодность	17	Технологическая наследственность	77
Результаты измерений	88	Технологическая система	7, 9, 39, 40, 67, 101
– воспроизводимость	88, 91, 94, 95, 106, 107	Трение	50, 56
– прецизионность	88	– граничное	51
– сходимость	88, 91, 94, 95, 106, 107	– жидкостное	51
Ресурс	27	– сухое	50
– средний	27		
– гамма-процентный	27	Ф	
		Функция Лапласа	34, 63, 79, 80
С			
Состояние изделий		Ш	
– критическое	12	Шероховатость поверхностей	41, 44, 45, 46, 57, 58, 99
– предельное	12		
– работоспособное	11		

ОСНОВНЫЕ ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПОНЯТИЯ (ГЛОССАРИЙ)

Безотказность – это способность изделия выполнять требуемую функцию в заданном интервале времени в данных условиях.

Воспроизводимость результатов измерений (воспроизводимость измерений) – это близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в различных местах, разными методами, разными средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям измерений (температуре, давлению, влажности и др.).

Внешнее трение (трение) – явление сопротивления относительно перемещению, возникающему между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним.

Восстанавливаемое изделие – изделие, которое при данных условиях после отказа может быть возвращено в состояние, в котором оно может выполнять требуемую функцию.

Гамма-процентный ресурс – ресурс, в течение которого изделие не достигает предельного состояния.

Готовность – способность изделия выполнять требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены.

Долговечность – способность изделия выполнять требуемую функцию до достижения предельного состояния при заданных условиях использования и технического обслуживания.

Допускаемый износ – максимальный износ элемента изделия, при котором возможно его безопасное использование в течение последующего межремонтного цикла.

Достоверность измерений определяется степенью доверия к результату измерения и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах интервала результата измерений.

Измерительный процесс – процесс, преобразующий значение измеряемого параметра в результат измерения посредством использования ресурсов (средств измерительной техники и другого оборудования, оператора, окружающей среды и т.д.), регулируемый методикой выполнения измерения.

Интенсивность изнашивания – отношение величины износа к пути трения, на котором происходило изнашивание.

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах (единицах длины, объема, массы и др.).

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

Мгновенный коэффициент готовности – вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии.

Мгновенная интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказов невосстанавливаемого изделия, которая находится для рассматриваемого момента времени при условии, что отказ до этого времени не возник.

Надежность – свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания.

Наработка до отказа – наработка, накопленная от первого использования изделия или его восстановления.

Неисправность – состояние изделия, характеризующееся неспособностью выполнять требуемую функцию, исключая такую неспособность во время профилактического обслуживания или других запланированных действий, или из-за нехватки внешних ресурсов.

Невосстанавливаемое изделие – изделие, которое не может быть возвращено в состояние, в котором оно способно выполнять требуемую функцию, изделие является *невосстанавливаемым*.

Опорное значение (предполагаемое истинное значение) – среднее арифметическое значение, полученное при многократном измерении ($n \geq 20$) параметра образца (детали) в метрологической лаборатории с использованием СИ более высокой точности, чем СИ измерительного процесса.

Поверхностный слой – слой металла с измененной структурой, фазовым и химическим составом по сравнению с основным металлом, из которого изготовлена деталь.

Повреждение – приемлемая для пользователя неполная способность изделия выполнять требуемые функции.

Правильность измерений – характеризует степень близости среднего арифметического значения большого числа результатов измерений к истинному значению.

Предельный износ – износ, соответствующий предельному состоянию изнашиваемого изделия или его составной части.

Прецизионность результатов измерений – степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях.

Предельное состояние изделия – состояние изделия, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна по причинам безопасности, экономическим, экологическим.

Работоспособное состояние – состояние изделия, при котором оно способно выполнять требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы.

Резервирование – способ повышения надежности изделия путем включения резервных элементов, способных в случае отказа основного элемента выполнить его функции.

Релаксация – постепенное изменение напряжений в детали, сопровождающееся постоянной ее деформацией.

Ремонтпригодность характеризуют затратами времени на обнаружение повреждений и восстановление изделия или его элементов после отказа и поддержание его в работоспособном состоянии путем регулярного технического обслуживания.

Ресурс – суммарная наработка изделия в течение срока службы.

Срок службы – это продолжительность эксплуатации изделия или ее возобновления после капитального ремонта до наступления предельного состояния.

Стабильность измерительного процесса (статистически управляемое состояние) – состояние измерительного процесса, при котором удалены все особые (неслучайные) причины изменчивости, т.е. наблюдаемая изменчивость может быть объяснена системой обычных (случайных) причин.

Сходимость результатов измерений (сходимость измерений) – это близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.

Технологическая наследственность – явление переноса свойств объектов от предшествующих операций к последующим, обусловленное наличием технологических связей между ними.

Технологическая система – совокупность функционально связанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных ТП или операций.

Трение без смазки (сухое трение) – трение двух твердых тел при отсутствии на поверхности трения смазочного материала любого типа.

Таблицы математической статистики

П 1.1. Значения интеграла вероятностей $\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-0,5z^2} \cdot dz$

z	$\Phi_0(z)$	z	$\Phi_0(z)$	z	$\Phi_0(z)$	z	$\Phi_0(z)$
0,01	0,0040	0,31	0,1217	0,72	0,2642	1,80	0,4641
0,02	0,0080	0,32	0,1255	0,74	0,2703	1,85	0,4678
0,03	0,0120	0,33	0,1293	0,76	0,2764	1,90	0,4713
0,04	0,0160	0,34	0,1331	0,78	0,2823	1,95	0,4744
0,05	0,0199	0,35	0,1368	0,80	0,2881	2,00	0,4772
0,06	0,0239	0,36	0,1406	0,82	0,2939	2,05	0,4798
0,07	0,0279	0,37	0,1443	0,84	0,2995	2,10	0,4821
0,08	0,0319	0,38	0,1480	0,86	0,3051	2,15	0,4842
0,09	0,0359	0,39	0,1517	0,88	0,3106	2,20	0,4861
0,10	0,0398	0,40	0,1554	0,90	0,3159	2,25	0,4878
0,11	0,0438	0,41	0,1591	0,92	0,3212	2,3	0,48928
0,12	0,0478	0,42	0,1628	0,94	0,3264	2,35	0,49061
0,13	0,0517	0,43	0,1664	1,96	0,3315	2,40	0,49180
0,14	0,0557	0,44	0,1700	1,98	0,3365	2,45	0,49286
0,15	0,0596	0,45	0,1736	1,00	0,3413	2,50	0,49379
0,16	0,0636	0,46	0,1772	1,05	0,3531	2,55	0,49461
0,17	0,0675	0,47	0,1808	1,10	0,3643	2,60	0,49534
0,18	0,0714	0,48	0,1844	1,15	0,3749	2,65	0,49598
0,19	0,0753	0,49	0,1879	1,20	0,3849	2,70	0,49653
0,20	0,0793	0,50	0,1915	1,25	0,3944	2,75	0,49702
0,21	0,0832	0,52	0,1985	1,30	0,4032	2,85	0,49781
0,22	0,0871	0,54	0,2054	1,35	0,4115	2,95	0,49841
0,23	0,0910	0,56	0,2123	1,40	0,4192	3	0,49865
0,24	0,0948	0,58	0,2190	1,45	0,4262	3,1	0,49918
0,25	0,0987	0,60	0,2257	1,50	0,4332	3,2	0,49931
0,26	0,1020	0,62	0,2324	1,55	0,4394	3,4	0,49966
0,27	0,1064	0,64	0,2389	1,60	0,4452	3,6	0,49984
0,28	0,1103	0,66	0,2454	1,65	0,4505	3,8	0,499928
0,29	0,1141	0,68	0,2517	1,70	0,4554	4	0,4999683
0,30	0,1179	0,70	0,2580	1,75	0,4599	4,5	0,4999966
						5	0,499999713

Примечание: В таблице приведены значения функции Лапласа для положительных аргументов. Значения функции для отрицательных аргументов определяются по формуле $\Phi(-z) = -\Phi(z)$.

П 1.2. Значения гамма-функции $\Gamma(x)$

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,00	1,000	1,25	0,9064	1,50	0,8862	1,75	0,9191
1,01	0,9943	1,26	0,9044	1,51	0,8866	1,76	0,9214
1,02	0,9888	1,27	0,9025	1,52	0,8870	1,77	0,9238
1,03	0,9835	1,28	0,9007	1,53	0,8876	1,78	0,9262
1,04	0,9784	1,29	0,8990	1,54	0,8882	1,79	0,9288
1,05	0,9735	1,30	0,8975	1,55	0,8889	1,80	0,9314
1,06	0,9687	1,31	0,8960	1,56	0,8896	1,81	0,9341
1,07	0,9642	1,32	0,8946	1,57	0,8905	1,82	0,9368
1,08	0,9597	1,33	0,8934	1,58	0,8914	1,83	0,9397
1,09	0,9555	1,34	0,8922	1,59	0,8924	1,84	0,9426
1,10	0,9514	1,35	0,8912	1,60	0,8935	1,85	0,9456
1,11	0,9474	1,36	0,8902	1,61	0,8947	1,86	0,9487
1,12	0,9436	1,37	0,8893	1,62	0,8959	1,87	0,9518
1,13	0,9399	1,38	0,8885	1,63	0,8972	1,88	0,9551
1,14	0,9364	1,39	0,8879	1,64	0,8986	1,89	0,9584
1,15	0,9330	1,40	0,8873	1,65	0,9001	1,90	0,9618
1,16	0,9298	1,41	0,8868	1,66	0,9017	1,91	0,9652
1,17	0,9267	1,42	0,8864	1,67	0,9033	1,92	0,9688
1,18	0,9237	1,43	0,8860	1,68	0,9050	1,93	0,9724
1,19	0,9209	1,44	0,8858	1,69	0,9068	1,94	0,9761
1,20	0,9182	1,45	0,8857	1,70	0,9086	1,95	0,9799
1,21	0,9156	1,46	0,8856	1,71	0,9106	1,96	0,9837
1,22	0,9131	1,47	0,8856	1,72	0,9126	1,97	0,9877
1,23	0,9108	1,48	0,8857	1,73	0,9147	1,98	0,9917
1,24	0,9085	1,49	0,8859	1,74	0,9168	1,99	0,9958
						2,00	1,0000

Гамма-функция для любого значения x вычисляется по формуле

$$\Gamma(x) = (x - 1) \cdot \Gamma(x - 1) \text{ и с помощью таблицы.}$$

Пример. Найти $\Gamma(3,7)$; 3,7 – число, которого нет в таблице.

Решение. $\Gamma(3,7) = (3,7 - 1) \cdot \Gamma(3,7 - 1) = 2,7 \cdot \Gamma(2,7)$

$\Gamma(2,7) = (2,7 - 1) \cdot \Gamma(2,7 - 1) = 1,7 \cdot \Gamma(1,7)$.

Далее по таблице $\Gamma(1,7) = 0,9086$; $\Gamma(2,7) = 1,7 \cdot 0,9086 = 1,5446$;

$\Gamma(3,7) = 2,7 \cdot 1,5446 = 4,1704$.

П 1.3. Значения константы D_2 для расчета СКО

Количество вычислений размаха G	Объем выборки, по которой считался размах, H													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,41	1,91	2,24	2,48	2,67	2,83	2,96	3,08	3,18	3,27	3,35	3,42	3,49	3,55
2	1,28	1,81	2,15	2,40	2,60	2,77	2,91	3,02	3,13	3,22	3,30	3,38	3,45	3,51
3	1,23	1,77	2,12	2,38	2,58	2,75	2,89	3,01	3,11	3,21	3,29	3,37	3,43	3,50
4	1,21	1,75	2,11	2,37	2,57	2,74	2,88	3,00	3,10	3,20	3,28	3,36	3,43	3,49
5	1,19	1,74	2,10	2,36	,56	2,73	2,87	2,99	3,10	3,19	3,28	3,35	3,42	3,49
6	1,18	1,73	2,09	2,35	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10	3,19	3,27	3,35	3,42	3,49
7	1,17	1,73	,09	2,35	2,55	2,72	2,87	2,99	3,10	3,19	3,7	3,35	3,42	3,48
8	1,17	1,72	,08	2,35	2,55	2,72	2,87	2,98	3,09	3,19	3,27	3,35	3,42	3,48
9	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	3,18	3,27	3,35	3,42	3,48
10	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	3,18	3,27	3,35	3,42	3,48
11	1,16	1,71	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48
12	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,72	2,85	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48
13	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,71	2,85	2,98	3,09	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48
14	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71	2,85	2,98	3,08	3,18	3,27	3,34	3,41	3,48
15	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71	2,85	2,98	3,08	3,18	3,26	3,34	3,41	3,48
>15	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078	3,173	3,258	3,336	3,407	3,472

П 1.4. Значения квантилей распределения Стьюдента t_p

Число степеней свободы k	Доверительная вероятность P			Число степеней свободы k	Доверительная вероятность P		
	0,90	0,95	0,99		0,90	0,95	0,99
1	6,314	12,706	63,657	18	1,734	2,101	2,878
2	2,920	4,303	9,925	19	1,729	2,093	2,861
3	2,353	3,182	5,841	20	1,725	2,086	2,845
4	2,132	2,776	4,604	21	1,721	2,080	2,831
5	2,015	2,571	4,032	22	1,717	2,074	2,819
6	1,943	2,447	3,707	23	1,714	2,069	2,807
7	1,895	2,365	3,499	24	1,711	2,064	2,797
8	1,860	2,306	3,355	25	1,708	2,060	2,787
9	1,833	2,262	3,250	26	1,706	2,056	2,779
10	1,812	2,228	3,169	27	1,703	2,052	2,771
11	1,796	2,201	3,106	28	1,701	2,048	2,763
12	1,782	2,179	3,055	29	1,699	2,045	2,756
13	1,771	2,160	3,012	30	1,697	2,042	2,750
14	1,761	2,145	2,977	40	1,684	2,021	2,704
15	1,753	2,131	2,947	60	1,671	2,000	2,660
16	1,746	2,120	2,921	120	1,658	1,980	2,617
17	1,740	2,110	2,898	∞	1,645	1,960	2,576

Число степеней свободы $k = n - 1$, где n – объем выборки.

Физико-механические и фрикционные характеристики материалов

П 2.1. Значения модуля упругости

Материал	E , МПа	Материал	E , МПа
Чугун серый	$(0,8-1,5) \cdot 10^5$	Бронза оловянная	$(0,75-1,24) \cdot 10^5$
Чугун высокопрочный	$(1,2-1,6) \cdot 10^5$	Бронза безоловянная	$(1,05-1,5) \cdot 10^5$
Сталь углеродистая	$(2,0-2,1) \cdot 10^5$	Латунь	$(1,0-1,1) \cdot 10^5$
Сталь легированная	$(2,1-2,2) \cdot 10^5$	Фторопласт	$1,0 \cdot 10^3$

П 2.2. Значения фрикционно-контактных параметров при трении на воздухе без смазки материала детали по образцу из стали

Материал	Фрикционная усталость σ_0 , МПа	Показатель фрикционной усталости t_y	Коэффициент k	Молекулярная составляющая коэффициента трения f_m	Коэффициент гистерезисных потерь α_r	Фрикционная константа сопротивления сдвигу τ_0 , МПа
Чугун	660	4,1	4	0,097	–	–
Закаленная сталь	700	7,9	4	0,097	0,02	0,3
Бронза	630	–	4	0,06	0,04	1,7
Фторопласт	63	5,0	3	0,028	0,1	0,32

Значения геометрических параметров деталей

П 3.1. Ориентировочные значения параметров волнистости [17]

Обрабатываемый материал	Метод обработки и значения шероховатости	Поперечная волнистость		Продольная волнистость	
		W_z	R_w	W_z	R_w
Сталь	Круглое наружное шлифование, при $Ra = (0,8-0,4)$ мкм	3-0,75	25-10	–	–
	Плоское шлифование, при $Ra = (3,2-0,2)$ мкм	13-1,2	50-15	12-1,2	350-30
Чугун	Круглое наружное шлифование, при $Ra = (1,6-0,8)$ мкм	7,5-0,5	100-10	–	–
	Плоское шлифование, при $Ra = (1,6-0,2)$ мкм	4-0,8	80-20	9-1,3	200-40

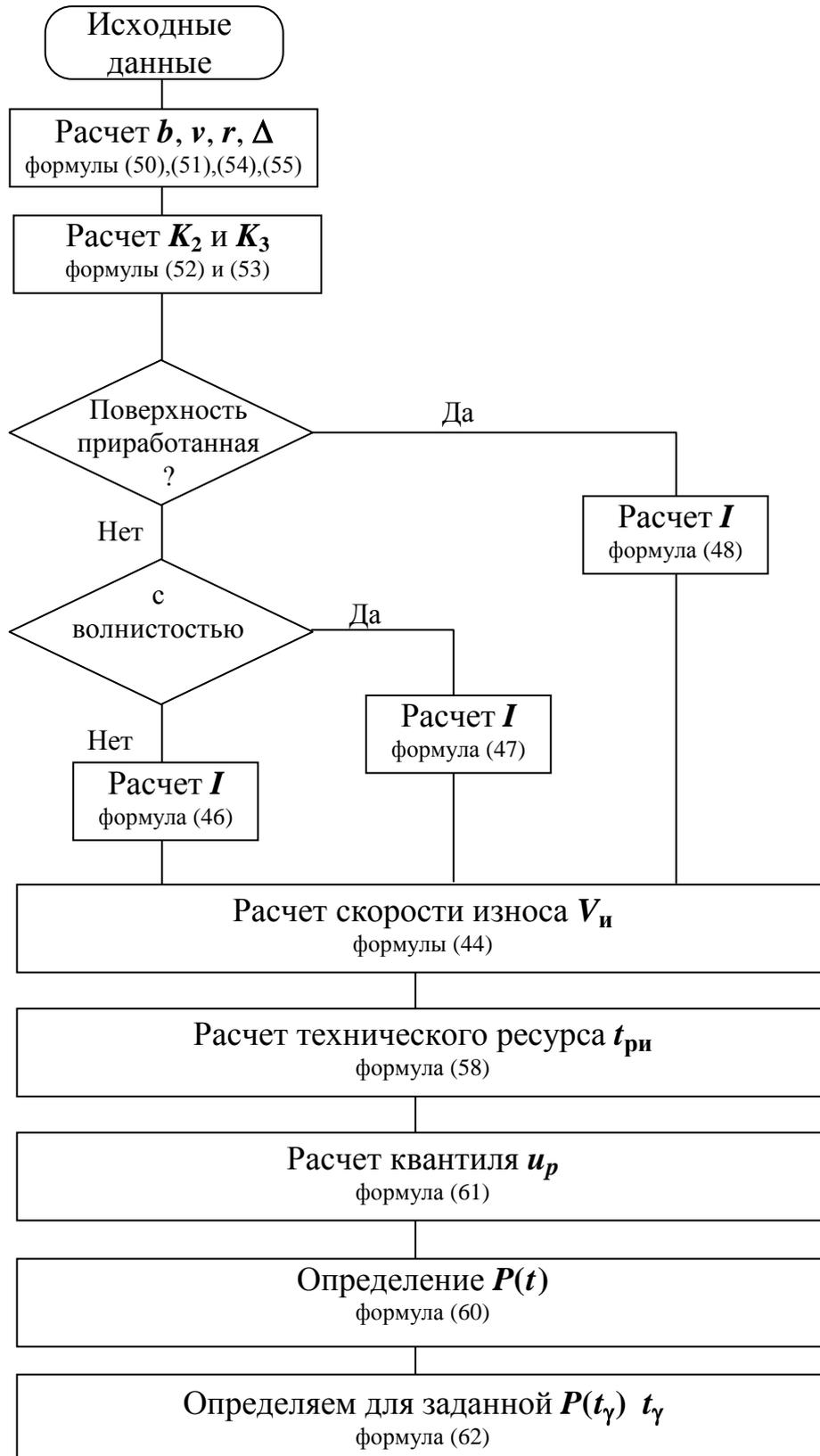
П 3.2. Радиус кривизны вершин выступов [5]

Вид обработки	Материал детали	Ra , мкм	Радиус кривизны вершин выступов		
			$r_{п}$	$r_{пр}$	r
Точение	сталь	0,63-5,0	120-20	120-60	10-35
	чугун	1,25-1,0	60-15	270-40	130-25
Круглое наружное шлифование	сталь	0,16-1,25	18-4	40-60	30-8
	чугун	0,32-2,5	25-13	1400-200	190-50
Полирование	сталь	0,16-0,63	1000-350	450-150	670-230
	чугун	–	–	–	–
Поверхностное пластическое деформирование	сталь	0,08-0,8	–	–	1200-300
	чугун	–	–	–	–
Растачивание	сталь	0,63-5,0	110-20	120-50	115-32
	чугун	0,63-5,0	20-10	20-13	20-12
Внутреннее шлифование	сталь	0,32-2,5	15-3	23-8	18-5
	чугун	0,32-2,5	35-7	57-19	45-12
Хонингование	сталь	0,08-0,63	20-4	160-60	70-15
	чугун	–	–	–	–

П 3.3. Ориентировочные значения параметров шероховатости, полученные для некоторых приработанных поверхностей [17]

Наименование объекта	<i>Ra</i> , мкм	<i>Rp</i> , мкм	<i>Rmax</i> , мкм	<i>r</i> , мкм	<i>b</i>	<i>v</i>	Δ
Поверхности стальных деталей в местах уплотнения резиновыми манжетами	0,13	0,52	0,72	180	3,1	3,0	$2,7 \cdot 10^{-10}$
Гильзы цилиндров	0,04	0,08	1,2	1000	–	1,0	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Поршневое кольцо (чугун)	0,03	0,1	0,15	85	1,8	2,3	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Поршневой палец	0,11	–	6,7	300	–	–	$2,2 \cdot 10^{-2}$
Поршень (отверстие в бобышках)	0,18	–	1,1	220	–	–	$5,0 \cdot 10^{-3}$
Втулка верхней головки шатуна	0,11	–	7,0	250	–	–	$2,8 \cdot 10^{-2}$
Коленчатый вал (коренные шатунные шестки)	0,05	0,12	1,6	500	–	1,2	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Вкладыши подшипника коленчатого вала	0,42	–	2,6	300	–	–	$8,6 \cdot 10^{-2}$

**Блок-схема последовательности расчета показателей надежности
при изнашивании**



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ измерительных систем. MSA. Ссылочное руководство: пер. с англ. – 3-е изд. – Нижний Новгород: Приоритет, 2005. – 223 с.
2. Гурвич, И. Б. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей / И. Б. Гурвич, П. Э. Сыркин, В. И. Чумак. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1994. – 144 с.
3. Ефимов, В. В. Средства и методы управления качеством: учебное пособие / В. В. Ефимов. – М.: КНОРУС, 2007. – 232 с.
4. Маталин, А. А. Технология машиностроения : учебник / А. А. Маталин. – СПб.: Лань, 2008. – 512 с.
5. Машиностроение. Энциклопедия : в 40 т. Т. IV-3. Надежность машин / В. В. Клюев, В. В. Болотин, Ф. Р. Соснин и др.; под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1998. – 592 с.
6. Надежность машиностроительной продукции. Практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. – М.: Изд. стандартов, 1990. – 328 с.
7. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
8. Правиков, Ю. М. Метрологическое обеспечение производства / Ю. М. Правиков, Г. Р. Муслина. – М.: КНОРУС, 2009. – 240 с.
9. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
10. Расторгуев, Г. А. Особенности технологического наследования в машиностроительном производстве // Инженерный журнал. Справочник. – 2013. – № 9. С. 8 – 17.
11. Синопальников, В. А. Надежность и диагностика технологических систем / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев : учебник. – М.: ИЦ МГТУ «Станкин, Янус-К», 2003. – 331 с.
12. Скворцов, А. В. Основы технологии автоматизированных машиностроительных производств : учебник / А. В. Скворцов, А. Г. Схиртладзе. – М.: Высшая школа, 2010. – 589 с.
13. Суслов, А. Г. Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин : учебное пособие / А. Г. Суслов, И. М. Корсакова. – М.: МГИУ, 2010. – 111 с.
14. Суслов, А. Г. Организационно-технологическое обеспечение оптимальной долговечности изделий машиностроения на всех этапах их жизненного цикла / А. Г. Суслов, И. В. Говоров. – Инженерный журнал. Справочник. – 2010, № 6. – С. 3 – 5.

15. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.

16. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. Т. 1 / А. М. Дальский, А. Г. Косилова и др.; под. ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 912 с.

17. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: в 2-х кн. Кн. 1 / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.

18. Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. Ю. Шишмарев. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.

19. Юркевич, В. В. Надежность и диагностика технологических систем : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. В. Юркевич, А. Г. Схиртладзе. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 304 с.

Учебное издание

ПРАВИКОВ Юрий Михайлович
МУСЛИНА Галина Рафаиловна

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Учебное пособие

ЛР № 000000 от __.__.____

Подписано в печать Формат
Усл. печ. л. Тираж экз. Заказ

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32
Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32