

621.910(075.8)

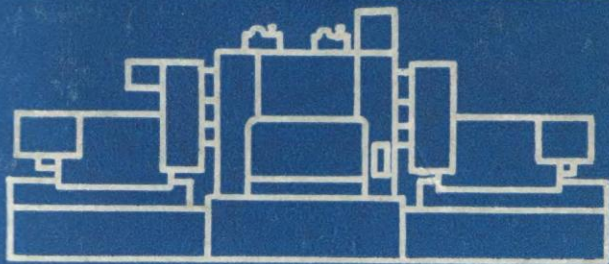
721 225

К 75

**ОСНОВЫ  
НАДЕЖНОСТИ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ  
СТАНКОВ  
И  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
ПРИБОРОВ**

**А. И. КОЧЕРГИН**

**Л. Д. КОВАЛЕВ**



**А. И. КОЧЕРГИН, Л. Д. КОВАЛЕВ**

**ОСНОВЫ  
НАДЕЖНОСТИ  
МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ  
СТАНКОВ  
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
ПРИБОРОВ**

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования БССР в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты»

**Издательство «Вышэйшая школа»  
Минск 1974**

6П4. 6+6П5. 8

К55

УДК [621. 9. 06+531 .7] .001. 32 (075.8)

Рецензенты: кафедра «Технология машиностроения и металлорежущие станки» Харьковского политехнического института; старшие научные сотрудники Института проблем надежности и долговечности машин АН БССР И. А. Зусман, Э. Ф. Капанец.

К  $\frac{3124 - 152}{M304(05) - 74}$  58 — 74

© Издательство «Высшая школа», 1974.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная техника предъявляет высокие требования к качеству металлорежущих станков, станочных автоматических линий, режущих инструментов, приспособлений, измерительных приборов. Качество металлорежущего оборудования характеризуется показателями технического уровня, технологичностью, надежностью, эстетическими, эргономическими и экономическими показателями.

Надежность станка — это составляющая качества, характеризующая собой приспособленность станка к сохранению всех остальных показателей во времени и восстановлению утраченной работоспособности. Надежность станка характеризуется его безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью, а также долговечностью его частей. Часто первоначально высокие технические характеристики станка (точность, жесткость, производительность и др.) быстро ухудшаются при его эксплуатации. Однако иногда станки с низкими показателями технических характеристик сохраняют их почти неизменными достаточно долго.

Понятно, что станки и первого и второго типов характеризуются низким качеством, хотя первые ненадежны в работе, а вторые — надежны. Станок считается высококачественным, если все его эксплуатационные свойства, в том числе и надежность, находятся на высоком уровне.

Повышение надежности металлорежущего оборудования является одной из важнейших задач советской промышленности. Возникновение проблемы надежности станков и автоматических линий объясняется следующими обстоятельствами.

1. Современное металлорежущее оборудование, особенно автоматизированные станки и автоматические ли-

нии, отличается сложностью конструкции. Очень многие станки оснащены сложными системами управления: гидравлическими, пневматическими, электронными и др. Автоматические линии часто включают десятки станков и других агрегатов. Например, автоматическая линия ЛМ 172 Минского завода автоматических линий, обрабатывающая четыре детали за один цикл, состоит из 15 станков. Кроме того, в линию входят пять гидростанций, две контрольные станции и другое оборудование. В линии работает 27 силовых головок и столов со сверлильными, расточными, обточными, разбонарезными, подрезными и фрезерными бабками. Станки этой линии имеют 124 шпинделя и оснащены 184 режущими инструментами.

Количество электрических и гидравлических аппаратов, входящих в автоматические линии и сложные металлорежущие станки, равно сотням и тысячам. Например, в автоматической линии ЛМ 150 использовано 12 750 электрических аппаратов, в том числе 1387 путевых выключателей, 281 контактор, 515 сигнальных ламп, 1972 промежуточных реле.

Усложнение металлорежущего оборудования, вызываемое прогрессом техники, обычно приводит к снижению его надежности, если не принимаются специальные меры для повышения надежности элементов оборудования, улучшения компоновки, совершенствования эксплуатации и т. д.]

2. Вынужденные простои современных станков и особенно автоматических линий приводят к большим потерям. Это объясняется в первую очередь высокой номинальной производительностью современного металлорежущего оборудования.

3. В последнее время значительно повысились требования к качеству деталей машин: необходимо обеспечивать точность геометрических форм отверстий и валов в пределах 0,002—0,0005 мм, неперпендикулярность, непараллельность, неконцентричность поверхностей многих деталей в пределах 0,003—0,0006 мм, чистоту обработки в пределах 11—12 классов.

Соответственно требованиям машиностроения металлорежущие станки должны быть более точными, жесткими, производительными, чем одно-два десятилетия назад. Чтобы первоначальные эксплуатационные характери-

ки сохранялись достаточно долго, станки должны быть надежными.

Значение работы, направленной на повышение надежности, доказываются следующими примерами: 1) ежегодно на ремонт металлорежущих станков затрачиваются средства, составляющие 20—25% от их первоначальной стоимости. На ремонт станка за весь срок эксплуатации затрачиваются средства, в 6—8 раз превышающие его первоначальную стоимость; 2) на каждые 10 человек, изготовляющих станки, приходится 35—40 человек, выполняющих ремонт и техническое обслуживание уже эксплуатирующихся станков.

Конструкторы, технологи и эксплуатационники не могут обеспечить и длительно сохранять высокие технические характеристики металлорежущего оборудования, опираясь только на опыт и интуицию. Необходимо использовать научные методы управления качеством, и в частности, надежностью станков и станочных автоматических линий.

Решение проблемы надежности машин, в том числе и металлорежущих станков, состоит из двух этапов: а) изучения процесса изменения показателей качества машин во времени; б) на основании этого — разработки научных методов управления надежностью.

На каждом этапе возникают многочисленные и сложные задачи, в частности: изучение физики отказов; разработка системы количественных показателей надежности; создание методов испытаний на надежность; разработка методик расчета надежности, т. е. прогнозирования ее на стадии конструирования станков и линий; разработка экономичных методов повышения надежности; технико-экономическое обоснование оптимального уровня надежности; разработка методов обеспечения заданного уровня надежности станков и автоматических линий.

Необходимый уровень надежности металлорежущего оборудования закладывается при его проектировании и обеспечивается при изготовлении. Задача эксплуатационников — поддерживать надежность работающего оборудования путем его правильной эксплуатации, своевременных и качественных ремонтов.

Невозможно решить проблему надежности металлорежущего оборудования только силами работников стан-

костроения. Этой работой занимаются металлурги и металловеды, химики, работники электротехнической промышленности, физики, математики и экономисты и др. Данное учебное пособие, предназначенное для студентов, обучающихся по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» и «Приборы точной механики», охватывает большой комплекс вопросов, связанных с обеспечением требуемого уровня надежности металлорежущих станков, автоматических линий, измерительных приборов. Цель курса — научить будущих инженеров методам управления надежностью этих изделий на всех этапах их проектирования, изготовления и эксплуатации.

Наука о надежности приобретает особенно большое значение, когда приходится иметь дело со сложными системами, поэтому мы не ограничиваемся рассмотрением вопросов надежности деталей и узлов станков и приборов, а излагаем также вопросы надежности сложных автоматизированных станков, автоматических линий и их систем управления.

Авторы выражают благодарность рецензентам: канд. техн. наук, доценту кафедры «Технология машиностроения и металлорежущие станки» Харьковского политехнического института Б. М. Агееву, ст. научным сотрудникам Института проблем надежности и долговечности машин АН БССР И. А. Зусману, Э. Ф. Капанцу.

# Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

## 1. 1. Термины теории надежности

Термины теории надежности в технике должны соответствовать ГОСТу 13377—67 «Надежность в технике. Термины» и ГОСТу 16503—70 «Промышленные изделия. Номенклатура и характеристики основных показателей надежности» [8, 9]. Понятия, приведенные в стандартах, рассматриваются применительно к определенным режимам и условиям эксплуатации, в том числе к условиям хранения и транспортирования.

Теория надежности изучает изделия. Изделием может быть система и ее элементы, в частности машины, аппараты, приборы, сооружения, а также их части, узлы, агрегаты и детали<sup>1</sup>.

Каждое изделие должно выполнять заданные функции. Например, функции специального станка заключаются в обработке деталей в соответствии с чертежом и с заданными средней производительностью и уровнем рентабельности.

Заданные функции изделия устанавливаются технической документацией: стандартами, нормативами, техническими условиями.

Техническая документация устанавливает также параметры изделия, которые можно разделить на две группы: 1) параметры, влияющие на эксплуатационные показатели изделия (например, параметры точности, жесткости, виброустойчивости, производительности металлорежущего станка); 2) параметры, не влияющие на эксплуатационные показатели изделия, т. е. на его функции.

---

<sup>1</sup> В проекте нового стандарта, включающего термины по надежности, вместо понятия «изделие» введено более широкое обобщающее понятие «объект». *Объект* — это предмет целевого назначения, который может использоваться по назначению, изучаться, исследоваться или испытываться на надежность [23]. В данной работе будут использоваться оба понятия: изделие и объект.



онирование. Это, например, требования к качеству щитка, предохраняющего рабочего от охлаждающей жидкости; к толщине слоя краски, покрывающего станину станка.

Работоспособностью изделия называют его состояние, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

Изделие называют неисправным, если оно не соответствует хотя бы одному из требований технической документации. Например, металлорежущий станок считается неисправным, если он вышел за пределы норм точности хотя бы по одной из проверок норм точности, установленных технической документацией. В то же время этот станок может быть работоспособным, если обрабатываемая деталь получается годной. Следовательно, изделие может быть неисправным, но в то же время работоспособным.

Событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия, называется отказом. В определении отказа говорится не только о полной потере работоспособности, но и о частичном нарушении ее. Например, такие неисправности станка, как поломка зуба шестерни, разрыв трубы в гидросистеме, поломка рычага переключения подач, вызывают отказ станка. При этом работоспособность станка утрачивается полностью. Перегрев подшипников шпинделя также ведет к отказу. При этой неисправности работоспособность станка нарушается, хотя и не утрачивается полностью.

Признаки, по которым можно утверждать, что данное изделие отказало, необходимо задавать технической документацией на это изделие. Одни изделия могут иметь не более одного отказа. В случае его появления эти изделия не подлежат ремонту в условиях эксплуатации и называются неремонтируемыми. Примеры неремонтируемых изделий: электронные лампы, подшипники качения, поршневые кольца.

Другие изделия могут иметь более одного отказа. После каждого отказа их работоспособность восстанавливают ремонтом, при этом изделия останавливаются (выключаются). Такие изделия называют ремонтируемыми. Режущие инструменты, металлорежущие станки

и большинство их узлов, автоматические линии являются ремонтируемыми изделиями.

Продолжительность или объем работы изделия, измеряемые в часах, циклах, километрах или других единицах, называется наработкой.

Понятия надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость характеризуют свойства изделий.

Надежность — свойство изделия выполнять заданные функции при сохранении своих эксплуатационных показателей в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки. Надежность характеризует способность изделия сохранять эксплуатационные показатели во времени и обуславливается его безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью, долговечностью.

Безотказность — свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторого срока службы или некоторой наработки без вынужденных перерывов. Например, безотказность автоматической линии — свойство сохранять работоспособность в течение небольших промежутков времени (минут или десятков минут) без вынужденных перерывов.

Свойство этой же линии сохранять работоспособность длительно (в течение ряда лет) до предельного состояния, но с перерывами для ремонтов и технического обслуживания называется долговечностью.

Признаки предельного состояния необходимо оговаривать в технической документации. Для одних изделий предельное состояние наступает, когда дальнейшая эксплуатация их невозможна. Например, направляющие станка имеют большой износ, и станок не обеспечивает необходимой точности обработки. Для других изделий предельное состояние определяется требованием безопасности, а для третьих — снижением их эффективности.

Ремонтпригодность — свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость — свойство изделия сохранять обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортирования, установленного в технической документации.

У На примерах можно показать, что надежность изделия действительно обуславливается его безотказностью, ремонтпригодностью, сохраняемостью, долговечностью. Пусть имеются два станка-автомата: первый отказывает в среднем два раза в течение смены, а второй — четыре раза. На устранение одного отказа первого станка затрачивается в среднем 10, а второго — 15 мин. Следовательно, первый станок простаивает из-за отказов в среднем 20, а второй—60 мин за смену. Первый станок выполняет свои функции лучше, чем второй. У первого станка выше ремонтпригодность и безотказность, и он более надежный.

Для различных изделий на первом месте стоит или требование безотказности, или требование долговечности, или безотказности и ремонтпригодности одновременно, или другие сочетания требований.

Безотказность очень важна для самолетов, ракет, многих машин, приборов, для тяжелых металлорежущих станков в течение одной операции при обработке на них дорогих и точных деталей

Для большинства металлорежущих станков на первом месте стоит требование долговечности, а не безотказности. Это объясняется тем, что задача обеспечения высокой долговечности станка равноценна требованию свести к минимуму затраты на обслуживание и ремонт станка, на замену износившихся частей. Все станки должны иметь высокий уровень ремонтпригодности.

## 1. 2. Функционирование неремонтируемых и ремонтируемых изделий

Как уже было отмечено, все изделия можно разделить на неремонтируемые и ремонтируемые. Работоспособность неремонтируемых изделий после их отказа не восстанавливается. Это обуславливается их физико-химическими или конструктивными особенностями, а иногда экономическими соображениями. Эти изделия могут подвергаться профилактическому обслуживанию.

Наработка  $\tau$  от начала эксплуатации неремонтируемого изделия до его отказа называется *наработкой до отказа* или *временем безотказной работы*<sup>1</sup>. Если испыты-

<sup>1</sup> В том случае, если наработка выражена в единицах времени.

вать или эксплуатировать  $n$  экземпляров изделия в определенных условиях, для них будут получены различные, случайные величины  $\tau$  (рис. 1. 1). Наработка до

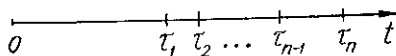


Рис. 1. 1. Рассеивание наработки до отказа

отказа  $\tau$  есть непрерывная случайная величина. Восстановление работоспособности ремонтируемого изделия после возникновения отказа предусмотрено конструктором при проектировании этого изделия.

Схема функционирования ремонтируемого изделия изображена на рис. 1. 2. Изделие работает безотказно в промежутки  $\tau'_1, \tau'_2, \dots, \tau'_n$ . Длина каждого промежутка  $\tau'_i$  называется временем безотказной работы или наработкой между отказами.

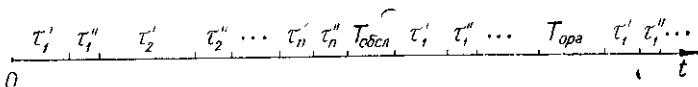


Рис. 1. 2. Функционирование ремонтируемого изделия

В промежутках времени  $\tau''_1, \tau''_2, \dots, \tau''_n$  происходит восстановление изделий после отказов (отыскание и устранение отказа или замена отказавшего элемента). Длина каждого промежутка  $\tau''_i$  называется временем восстановления. Величины  $\tau'_i, \tau''_i$  случайные, распределенные по некоторым законам. В промежутке времени  $T_{обсл}$  выполняется плановое техническое обслуживание и плановые ремонты изделия. Часто имеют место простои изделия по организационным причинам в течение времени  $T_{орг}$ . Так, автоматические линии некоторое время простаивают из-за отсутствия заготовок, электроэнергии и т. д.

Промежутки времени  $\tau'_i$  образуют поток отказов, а промежутки  $\tau''_i$  — поток восстановлений.

Часто изделия состоят из большого количества элементов, каждый из которых отказывает редко. Вероятность появления одновременно двух отказов в таких изделиях равна нулю, и поток отказов называется ординарным. Если на вероятность появления отказов на дан-

ном интервале времени не влияет наличие их на каком-либо предыдущем интервале, такой поток отказов называется потоком без последствия.

В начальный период эксплуатации сложного изделия (период приработки) среднее число отказов в единицу времени непостоянно, и поток отказов называется нестационарным. По окончании периода приработки среднее число отказов в единицу времени становится постоянным. Такой поток отказов называется стационарным. Стационарный ординарный поток без последствия называется простейшим или стационарным пуассоновским.

### 1. 3. Общая характеристика испытаний на надежность

Уровень надежности изделий оценивается количественно показателями надежности, которые определяются по результатам испытаний изделия, в целом или составляющих его элементов, а также наблюдениями за работой изделия в условиях эксплуатации. После каждого испытания проводят измерение или подсчет. Результат наблюдения также называют наблюдением.

Испытания на надежность или эксплуатационные наблюдения выполняются выборочным методом. Будем рассматривать два случая. Первый из них характеризуется тем, что имеется большая совокупность изделий, называемая генеральной совокупностью. Случайным образом отобранные из этой совокупности  $n$  изделий составляют случайную выборку. Число  $n$  называется объемом выборки. Отобранные  $n$  изделий подвергаются испытаниям на надежность или наблюдениям в условиях эксплуатации. Результатом испытаний или наблюдений является выборка, состоящая из  $n$  чисел:  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . При этом каждому элементу из выборки изделий соответствует один элемент из последней выборки чисел.

Второй случай характеризуется тем, что испытаниям или наблюдениям подвергается одно ремонтируемое изделие и выборка  $x_1, x_2, \dots, x_n$  берется из генеральной совокупности, элементами которой являются значения наработки между соседними отказами, или затраты времени на восстановление работоспособности изделия пос-

ле каждого отказа, или числа отказов в единицу времени и т. д.)

Методы математической статистики, применяемые для обработки экспериментальных данных, позволяют сделать выводы о свойствах генеральной совокупности по свойствам выборки. Необходимость применения методов статистики при экспериментальном изучении надежности объясняется тем, что испытания на надежность проводятся выборочно; статистическим характером многих показателей надежности и тем, что из-за наличия случайных факторов каждый результат испытания является случайной величиной.

Некоторые методы математической статистики, применяемые при изучении надежности, изложены в главе шестой.

По выборке  $x_1, x_2, \dots, x_n$  можно определить среднее выборки

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1)$$

и дисперсию выборки

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (1.2)$$

которую удобно вычислять по формуле

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n} \right]. \quad (1.3)$$

Квадратный корень  $s$  из выборочной дисперсии  $s^2$  называется *средним квадратическим отклонением выборки*. Выборочное среднее и выборочная дисперсия изменяются случайным образом от выборки к выборке, т. е. являются случайными величинами. Следовательно,  $\bar{x}$  и  $s^2$  распределены по некоторым законам.

Математическое ожидание  $a$  генеральной совокупности называется *генеральным средним*, а ее дисперсия  $\sigma^2$  — *генеральной дисперсией*. Выборочное среднее и выборочная дисперсия являются оценками соответственно генерального среднего и генеральной дисперсии. Погрешность оценки уменьшается с увеличением объема выбор-

ки. С вероятностью единица выборочные параметры стремятся к генеральным параметрам при  $n \rightarrow \infty$ .

#### 1. 4. Показатели надежности, общие для неремонтируемых и ремонтируемых изделий

ГОСТ 16503—70 «Промышленные изделия. Номенклатура и характеристики основных показателей надежности» регламентирует 39 показателей надежности. Одни из них применимы только к неремонтируемым изделиям, другие — только к ремонтируемым, третьи — к изделиям обоих классов.

Рассмотрим показатели надежности последнего типа.

*Ресурс* — наработка изделия до предельного состояния, оговоренного в технической документации.

*Срок службы* — календарная продолжительность эксплуатации изделия до предельного состояния, оговоренного в технической документации, или до списания. При одном и том же ресурсе срок службы изделий может быть различным в зависимости от интенсивности эксплуатации изделия.

*Назначенный ресурс* — наработка изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния изделия. Назначенный ресурс устанавливается для безопасности эксплуатации или из экономических соображений.

*Гамма-процентный ресурс* — это ресурс, который имеет и превышает в среднем  $\gamma$  процентов изделий данного типа. Например, говорят «девяностопятипроцентный ресурс насосов данного типа равен 5000 часам». Это значит, что в среднем 95% ( $\gamma=95\%$ ) насосов имеют ресурс не менее 5000 часов.

*Средняя трудоемкость технического обслуживания* — это средние суммарные трудозатраты на проведение технического обслуживания изделия за определенный период эксплуатации, измеряется в человеко-часах, зависит от свойств самого изделия и от уровня организации обслуживания.

*Удельная трудоемкость технического обслуживания* — отношение средней трудоемкости технического обслуживания к средней наработке изделия за один и тот же период эксплуатации.

*Срок сохраняемости* — календарная продолжитель-

ность хранения изделия в условиях, установленных технической документацией, в течение которой сохраняются обусловленные для этого изделия эксплуатационные показатели.

Кроме приведенных, стандартом вводятся показатели: средняя стоимость и удельная стоимость технического обслуживания; средний срок службы; гамма-процентный срок службы; средний срок и гамма-процентный срок сохраняемости.

## 1. 5. Показатели надежности неремонтируемых изделий

Опытные значения показателей надежности неремонтируемых изделий можно определить путем наблюдений за испытаниями или эксплуатацией  $n$  изделий в заданных условиях. При этом определяются наработки до отказа:  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ .

Среднее значение наработок изделий в партии до первого отказа называется *средней наработкой до первого отказа*. Этот термин применим как для ремонтируемых, так и для неремонтируемых изделий. Для неремонтируемых изделий вместо названного можно применять термин *средняя наработка до отказа*.

Статистическую оценку  $t_{cp}$  средней наработки до отказа можно определить по формуле

$$t_{cp} = \frac{1}{n} (\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n).$$

Надежность неремонтируемых изделий характеризуется двумя функциями распределения наработки до отказа: вероятностью безотказной работы  $P(t)$  и вероятностью отказа  $Q(t)$  до момента  $t$ .

Предположим, что изделие начинает работу в момент  $t=0$ , а в случайный момент  $\tau$  происходит отказ. Зафиксируем некоторый момент  $t$  (рис. 1.3). Вероятность того, что в интервале времени от 0 до  $t$  не возникает отказ

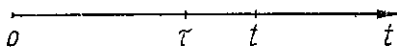


Рис. 1.3. Схема, поясняющая понятие «вероятность безотказной работы до момента  $t$ »



(т. е.  $\tau > t$ ), есть функция от  $t$ , которая называется *вероятностью безотказной работы до момента  $t$*  и обозначается  $P(t)$ :

$$P(t) = P(\tau > t).$$

Если при испытании или эксплуатации  $n$  изделий ( $n$  достаточно велико) к моменту  $t$  не отказали  $N(t)$  изделий, статистическая оценка вероятности безотказной работы до момента  $t$  выражается приближенным равенством:

$$P(t) \approx \frac{N(t)}{n}. \quad (1.4)$$

С возрастанием  $t$  вероятность  $P(t)$  убывает и  $P(0) = 1, P(\infty) = 0$ .

Вероятность отказа до момента  $t$ , обозначаемая  $Q(t)$ , есть вероятность того, что изделие откажет до момента  $t$ . Если  $\tau$  — момент, в который произошел отказ изделия,  $t$  — произвольный зафиксированный момент,

$$Q(t) = P(\tau < t).$$

Имеет место приближенное равенство

$$Q(t) \approx \frac{n - N(t)}{n}. \quad (1.5)$$

С возрастанием  $t$  вероятность  $Q(t)$  возрастает и  $Q(0) = 0, Q(\infty) = 1$ .

Отказ и безотказная работа изделия до момента  $t$  являются событиями противоположными. Поэтому

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (1.6)$$

Производная  $q(t)$  функции  $Q(t)$  называется *плотностью распределения наработки до отказа*:

$$q(t) = Q'(t), \quad (1.7)$$

откуда

$$q(t) = -P'(t). \quad (1.8)$$

Статистической оценкой для плотности распределения наработки до отказа  $q(t)$  является гистограмма. Для  $n$  изделий, отказы которых произошли при испыта-

ниях или в эксплуатации, гистограмма может быть построена следующим образом. Область значений наработки разбивают на несколько равных или неравных интервалов (обычно 8—15). Для каждого  $i$ -го интервала определяют число отказавших на нем изделий  $m_i$  и частоту  $\frac{m_i}{n}$ . Если значение наработки лежит на границе

двух интервалов, то данное изделие учитывают в обоих интервалах, прибавляя к числам  $m_i$  того и другого интервала по 0,5. Для построения гистограммы 1 (рис. 1.4) на оси абсцисс откладывают интервалы и на каждом из них строят прямоугольник. Высота прямоугольника пропорциональна соответствующей

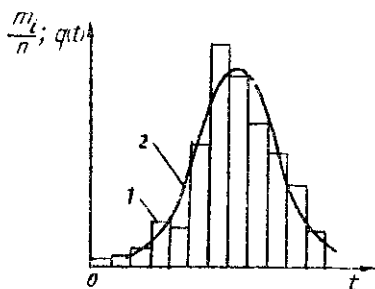


Рис. 1.4. Схема, поясняющая понятие «плотность распределения наработки до отказа»

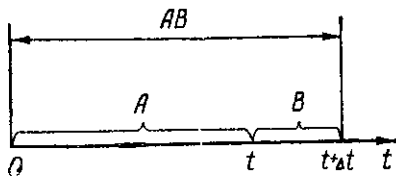
частоте  $\frac{m_i}{n}$  (в случае равных интервалов) или частотному от деления ее на длину интервала (при неравных интервалах). Теоретическая плавная кривая 2, приближающаяся к гистограмме 1, и есть кривая плотности распределения наработки до отказа  $q(t)$ .

ГОСТом 13377—67 для неремонтируемых изделий введен еще один показатель надежности, называемый *интенсивностью отказов*  $\lambda(t)$ . Прежде чем дать определение интенсивности отказов, выведем зависимость, которая позволяет вычислить вероятность безотказной работы изделия на интервале  $(t, t + \Delta t)$ , если известна зависимость  $P(t)$ .

Пусть  $A$  — событие, состоящее в безотказной работе изделия на интервале  $(0, t)$ ;  $B$  — событие, состоящее в безотказной работе на интервале  $(t, t + \Delta t)$ . Тогда событие, состоящее в безотказной работе на интервале  $(0, t + \Delta t)$ , есть  $AB$  (рис. 1.5). Если до момента  $t$  отказ не произошел, то вероятность события  $AB$  можно вычислить по формуле

$$P(AB) = P(A)P(B|A)$$

Вероятности событий  $A$  и  $AB$  суть  $P(t)$  и  $P(t+\Delta t)$ , тогда вероятность  $P(t+\Delta t)$  безотказной работы на интервале  $(t, t+\Delta t)$  равна



$$P(t, t+\Delta t) = P(B/A) = \frac{P(AB)}{P(A)} = \frac{P(t+\Delta t)}{P(t)}, \quad (1.9)$$

Рис. 1.5. Схема, поясняющая вычисление вероятности безотказной работы изделия на интервале  $(t, t+\Delta t)$

а вероятность отказа на том же интервале

$$Q(t, t+\Delta t) = 1 - P(t, t+\Delta t) = \frac{P(t) - P(t+\Delta t)}{P(t)}. \quad (1.10)$$

Чтобы ввести понятие об интенсивности отказов, преобразуем выражение (1.10), применив известную из математического анализа зависимость

$$P(t+\Delta t) \approx P(t) + P'(t)\Delta t. \quad (1.11)$$

Из выражений (1.10) и (1.11) получаем

$$Q(t, t+\Delta t) \approx -\frac{P'(t)}{P(t)}\Delta t. \quad (1.12)$$

Интенсивностью отказов называют отношение  $-\frac{P'(t)}{P(t)} = \frac{q(t)}{P(t)}$ , обозначаемое  $\lambda(t)$ :

$$\lambda(t) = -\frac{P'(t)}{P(t)} = \frac{q(t)}{P(t)}. \quad (1.13)$$

После введения  $\lambda(t)$  выражение (1.12) выглядит так:

$$Q(t, t+\Delta t) \approx \lambda(t)\Delta t.$$

В последней формуле примем  $\Delta t=1$  и получим

$$\lambda(t) \approx Q(t, t+1), \quad (1.14)$$

т. е. интенсивность отказов есть вероятность того, что неремонтируемое изделие, проработавшее безотказно до момента  $t$ , откажет в последующую единицу времени, если эта единица мала.

Выведем зависимость для опытного определения ин-

тенсивности отказов, когда на испытание поставлено  $n$  неремонтируемых изделий ( $n$  достаточно велико).

Если интервал времени  $\Delta t$  достаточно мал, то из выражения (1.13) получим

$$\lambda(t) \approx \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P(t)}, \quad (1.15)$$

а из зависимостей (1.4) и (1.15)

$$\lambda(t) \approx \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{\Delta t N(t)},$$

т. е. интенсивность отказов в момент  $t$  равна числу изделий, отказавших в единицу времени после него, деленному на число изделий, уцелевших к моменту  $t$  (рис. 1.6).

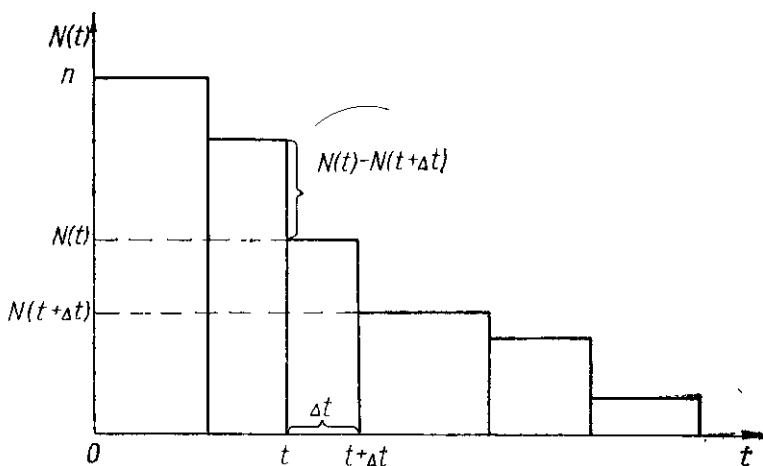


Рис. 1.6. Экспериментальное определение интенсивности отказов

**Пример.** На испытание поставили 200 изделий, из них после 100 ч испытаний уцелело 160. За последующие 5 ч отказало 20 изделий:

$$\lambda(100) \approx \frac{20}{5 \cdot 160} = 0,025.$$

## 1.6. Изменение интенсивности отказов во времени и общая формула для вероятности безотказной работы

Интенсивность отказов изделия есть функция времени его работы. Как показали наблюдения, для изделий различных типов характерны свои зависимости  $\lambda$  от  $t$ . На рис. 1.7 показаны два типа этих зависимостей из большого количества выявленных на практике.

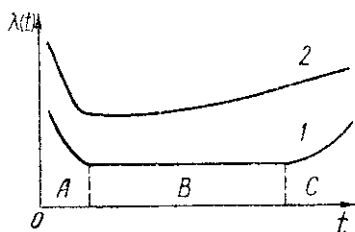


Рис. 1.7. Изменение интенсивности отказов в зависимости от времени работы изделия

Кривая 1 имеет три участка, каждому из которых соответствует определенный интервал времени. На интервале А интенсивность отказов быстро уменьшается. Это объясняется тем, что в испытуемой партии имелись изделия со скрытыми дефектами. Они отказывают в самом начале испытания или эксплуатации. Доля дефектных изделий в числе не отказавших быстро умень-

шается. А—период приработки изделий; В—период нормальной эксплуатации изделий. Здесь интенсивность отказов постоянна. Отказы появляются в результате того, что в случайные моменты времени возникают неблагоприятные сочетания уровней факторов, действующих на изделие. Отказы получаются внезапными. Они, как и неблагоприятные сочетания факторов, возникают в случайные моменты времени. В период нормальной эксплуатации не наблюдается существенного износа и старения изделий или их элементов. На интервале С интенсивность отказов значительно возрастает. Происходит это потому, что к внезапным отказам изделий добавляются отказы, возникающие в результате накопившихся износа и старения их элементов.

Кривая 2 изображает такое изменение интенсивности отказов, когда после периода приработки наступает период старения изделия.

Выведем зависимость между вероятностью безотказной работы до момента  $t$  и интенсивностью отказов

$\lambda(t)$ . Для этого проинтегрируем выражение (1.13):

$$\begin{aligned}\lambda(t) dt &= -\frac{dP(t)}{P(t)}; \\ \int_0^t \lambda(t) dt &= -\int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)}; \\ \ln P(t) &= -\int_0^t \lambda(t) dt; \\ P(t) &= e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.\end{aligned}\tag{1.16}$$

Последняя формула — наиболее общее выражение вероятности безотказной работы неремонтируемого изделия через интенсивность отказов, так как  $\lambda(t)$  может являться любой функцией времени.

Используя зависимости (1.9) и (1.16), получаем формулу, по которой определяется вероятность безотказной работы изделия в интервале  $(t, t+\Delta t)$ :

$$P(t, t+\Delta t) = e^{-\int_t^{t+\Delta t} \lambda(t) dt}.\tag{1.17}$$

### 1.7. Примеры распределений наработки до отказа неремонтируемых изделий

**Общие сведения.** Многочисленные испытания изделий и наблюдения за их работой в эксплуатации выявили, как распределяется наработка до отказа изделий того или иного типа при данных условиях работы. Параметры распределений определяются наблюдениями за отказами изделий в условиях эксплуатации или испытаний. Величины параметров распределений зависят от условий работы изделий. В некоторых случаях с изменением условий работы меняется даже вид распределения. Поэтому условия испытаний всегда стремятся приблизить к условиям эксплуатации изделий.

Рассмотрим общие свойства экспоненциального, нормального и распределения Вейбулла.

Приведем некоторые зависимости:

$$Q(t) = \int_0^t q(t) dt;\tag{1.18}$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t q(t) dt = \int_t^{\infty} q(t) dt; \quad (1.19)$$

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} q(t) t dt. \quad (1.20)$$

На основании выражений (1.16), (1.18)—(1.20) можно утверждать, что функции  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $q(t)$  и  $\lambda(t)$  являются эквивалентами в том смысле, что знание одной из них позволяет найти все остальные.

**Экспоненциальное распределение.** Для этого распределения интенсивность отказов является постоянной величиной:  $\lambda(t) = \lambda$ . По формуле (1.16) получаем сле-

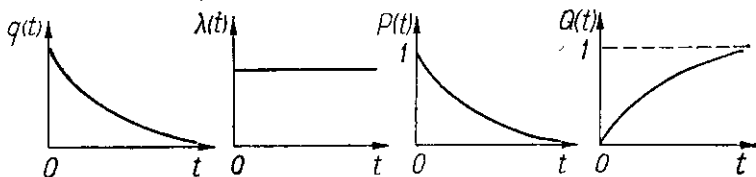


Рис. 1.8. Экспоненциальное распределение

дующее выражение вероятности безотказной работы до момента  $t$ :

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.21)$$

Тогда вероятность отказа до момента  $t$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t};$$

плотность распределения наработки до отказа

$$q(t) = Q'(t) = \lambda e^{-\lambda t}.$$

По формуле (1.20) средняя наработка до отказа

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Из последнего выражения получаем

$$\lambda = \frac{1}{T}, \quad (1.22)$$

т. е. для экспоненциального распределения интенсивность отказов есть величина, обратная средней наработке до отказа. Функция  $e^{-x}$  приводится в таблицах.

Графики зависимостей  $q(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $P(t)$ ,  $Q(t)$  для экспоненциального распределения показаны на рис. 1.8.

Экспоненциальное распределение обладает следующей особенностью. Вероятность безотказной работы на интервале  $(t_1, t_2)$  определяется только длиной  $t_2 - t_1$  этого интервала, но никак не зависит от продолжительности испытания или работы до начала этого интервала, т. е. от времени  $t_1$ . Это утверждение следует из выражения (1.17), если принять, что  $\lambda(t) = \lambda$ ,  $t = t_1$ ,  $t_2 = t_1 + \Delta t$ :

$$P(t_1, t_2) = e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda dt} = e^{-\lambda(t_2 - t_1)}$$

Экспоненциальное распределение описывает отказы элементов, теряющих работоспособность внезапно в результате неблагоприятного сочетания действующих факторов, например поломки в результате перегрузок. Этому распределению подчиняются электронные элементы систем управления станками, тонкие стержневые инструменты, выходящие из строя в результате поломок.

**Нормальное распределение.** Плотность распределения наработки до отказа выражается следующей зависимостью:

$$q(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение наработки до отказа;

$T$  — средняя наработка до отказа.

Вероятность безотказной работы до момента  $t$

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t-T}^{\infty} \frac{e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sigma} dx \quad (1.23)$$

или

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t-T}{\sigma}\right), \quad (1.24)$$

где  $\Phi$  — функция Лапласа (см. приложение 1).

Графики зависимостей  $q(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $P(t)$ ,  $Q(t)$  для нормального распределения показаны на рис. 1.9.

Теоретические исследования и практический опыт показали, что нормальное распределение возникает, ког-



да варьирование случайной величины является результатом действия большого числа относительно равноправных факторов. Это условие выполняется для процессов изнашивания, поэтому различные величины, ха-

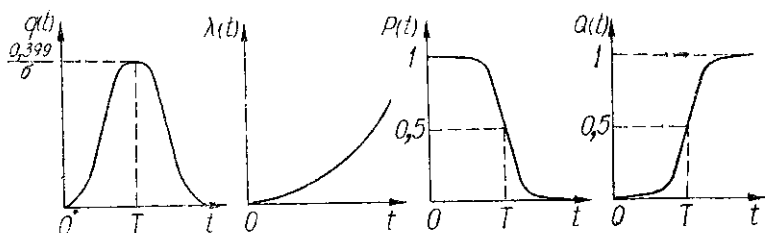


Рис. 1.9. Нормальное распределение

актеризующие результаты этих процессов, в том числе время безотказной работы по отказам из-за износа, подчиняются нормальному распределению или близким к нему распределениям (логарифмически-нормальному, гамма-распределению).

**Пример.** В результате статистического исследования узла получили нормальное распределение его наработки до отказа. Параметры  $T=1852$  ч;  $\sigma=731$  ч. Определить вероятность безотказной работы узла в течение  $t=2500$  ч.

Пользуясь формулой (1,24) и приложением 1, вычисляем искомую вероятность

$$P(2500) = 0,5 - \Phi\left(\frac{2500-1852}{731}\right) = 0,5 - \Phi(0,888) \approx 0,19.$$

**Распределение Вейбулла.** Для этого распределения

$$\begin{aligned} P(t) &= e^{-at^m}; \\ q(t) &= mat^{m-1}e^{-at^m}; \\ \lambda(t) &= mat^{m-1}, \end{aligned} \quad (1.25)$$

где  $a$  и  $m$  — постоянные параметры.

Графики зависимостей  $\lambda(t)$  и  $q(t)$  показаны на рис. 1.10. При  $m=1$  распределение Вейбулла переходит в экспоненциальное. Распределением Вейбулла описываются отказы элементов машин, одновременно имеющие признаки износных и внезапных отказов, например,

подшипников качения, конечных переключателей, электронных ламп.

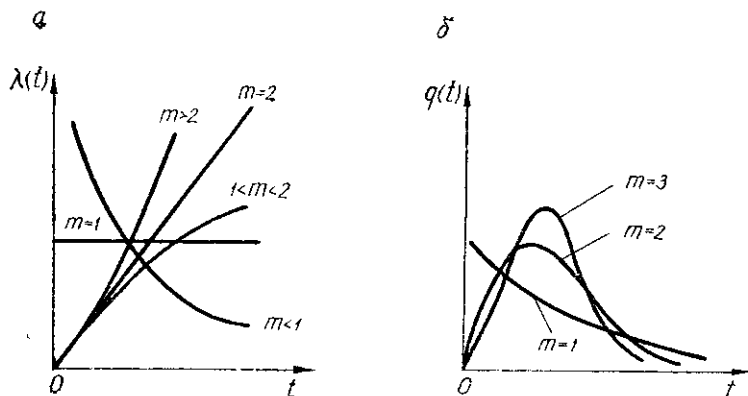


Рис. 1.10. Распределение Вейбулла:

а — изменение интенсивности отказов; б — изменение плотности распределения при  $\alpha=1$

## 1.8. Показатели надежности ремонтируемых изделий

Обратимся к схеме функционирования ремонтируемых изделий (см. рис. 1.2). Промежутки работоспособности такого изделия чередуются с промежутками простоев. ГОСТ 16503—70 установил целый ряд показателей надежности ремонтируемых изделий. Для опытного определения многих из них необходимо проводить наблюдения за испытаниями или эксплуатацией  $n$  изделий в заданных условиях. При этом фиксируется число отказов  $m_i(t)$  каждого изделия за время  $t$ .

Среднее число отказов за время  $t$

$$m_{\text{ср}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(t)}{n}. \quad (1.26)$$

Предел

$$H(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} m_{\text{ср}}(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n m_i(t)}{n}$$

называют *функцией восстановления*.

Одной из характеристик надежности ремонтируемых изделий является параметр потока отказов  $\omega(t)$ , который представляет собой среднее количество отказов в единицу времени, взятое для рассматриваемого момента времени:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}.$$

Приближенную величину  $\omega(t)$  можно найти по уравнению

$$\omega(t) \approx \frac{\sum_{i=1}^n m_i(t+\Delta t) - \sum_{i=1}^n m_i(t)}{n\Delta t}, \quad (1.27)$$

где  $\Delta t$  — достаточно малый промежуток времени.

В периоды приработки и старения изделия  $\omega(t)$  не остается постоянным, а в период нормальной эксплуатации  $\omega(t) = \omega = \text{const}$  и, как мы уже отмечали, такой поток отказов называется *стационарным*.

Другой важной характеристикой надежности изделий является *наработка на отказ*  $T$ , которая представляет собой среднее значение наработки между отказами<sup>1</sup>.

Если  $t_1$  и  $t_2$  — две различные наработки, для определения  $T$  можно записать точное равенство:

$$T = \frac{t_2 - t_1}{H(t_2) - H(t_1)} \quad (1.28)$$

и приближенное равенство

$$T \approx \frac{t_2 - t_1}{m_{\text{cp}}(t_2) - m_{\text{cp}}(t_1)}. \quad (1.29)$$

В общем случае наработка на отказ  $T$  изменяется со временем, но при стационарном потоке отказов  $T$  становится постоянной:

$$T = \frac{1}{\omega} \quad (1.30)$$

<sup>1</sup> Если наработка выражена в единицах времени, наряду с этим термином можно применять термин «среднее время безотказной работы».

или

$$T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (1.31)$$

где  $m$  — число отказов, полученных при испытании  $n$  изделий.

Показателем безотказности ремонтируемых изделий является *вероятность  $P(t_1, t_2)$  безотказной работы* в период между наработками  $t_1$  и  $t_2$ . Если  $H(t_1)$  и  $H(t_2)$  — математические ожидания числа отказов соответственно в интервалах наработок от 0 до  $t_1$  и от 0 до  $t_2$ ,

$$P(t_1, t_2) = e^{H(t_1) - H(t_2)}. \quad (1.32)$$

Отсюда следует, что в случае простейшего потока отказов вероятность безотказной работы изделия  $P(t)$  в интервале наработок от 0 до  $t$  определяется по формуле

$$P(t) = e^{-\omega t} = e^{-\frac{t}{T}}. \quad (1.33)$$

Это значит, что в случае простейшего потока наработка до отказа подчиняется экспоненциальному распределению.

Ремонтопригодность ремонтируемых изделий можно оценить по среднему времени восстановления, интенсивности восстановления  $\mu(t)$  и вероятности восстановления в заданное время  $P_B(t)$ , средней и удельной трудоемкости ремонтов, средней и удельной их стоимости.

Среднее время восстановления  $T_B$  равно среднему времени вынужденного не регламентированного простоя, вызванного отысканием и устранением одного отказа. Пусть на отыскание и устранение  $i$ -го отказа было затрачено время  $t_i$ , тогда среднее время восстановления

$$T_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i, \quad (1.34)$$

где  $m$  — число отказов.

*Интенсивность восстановления  $\mu(t)$*  — это вероятность восстановления работоспособности изделия в единицу времени при условии, что до момента  $t$  восстановление не произошло.

*Вероятность восстановления в заданное время  $P_B(t)$*  есть вероятность того, что отказ будет обнаружен и

устранен в течение заданного интервала времени  $(0, t)$ .  
 Рассмотрим еще два показателя надежности: коэффициент готовности и коэффициент технического использования. *Коэффициент готовности* — это вероятность того, что изделие будет работоспособно в любой момент времени в промежутках между выполнениями планового технического обслуживания.

Пусть в течение некоторого времени суммарная наработка равна  $\Sigma \tau'_i$ , суммарные простои на устранение отказов  $\Sigma \tau''_i$ , число отказов  $m$ .

Коэффициент готовности

$$k_r = \frac{\Sigma \tau'_i}{\Sigma \tau'_i + \Sigma \tau''_i}.$$

Разделив числитель и знаменатель этой дроби на  $m$ , получим

$$k_r = \frac{T}{T + T_{\text{в}}}, \quad (1.35)$$

где  $T$  — наработка на отказ;  
 $T_{\text{в}}$  — среднее время восстановления.

Если в течение некоторого времени суммарная наработка равна  $\Sigma \tau'_i$ , суммарные простои на устранение отказов  $\Sigma \tau''_i$ , суммарные простои на техническое обслуживание  $T_{\text{обсл}}$ , то *коэффициент технического использования* определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{т. и}} = \frac{\Sigma \tau'_i}{\Sigma \tau'_i + \Sigma \tau''_i + T_{\text{обсл}}}, \quad (1.36)$$

где все величины выражены в единицах времени.

Коэффициент готовности и коэффициент технического использования характеризуют одновременно безотказность и ремонтпригодность изделия.

Показателями долговечности ремонтируемых изделий являются межремонтный срок службы, срок службы до первого капитального ремонта, межремонтный ресурс, ресурс до первого капитального ремонта и др. Например, межремонтный срок службы — это календарная продолжительность эксплуатации изделия между двумя последовательными средними или капитальными ремонтами.

## Глава 2. ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В СТАНКАХ В ПЕРИОД ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

### 2.1. Вредные воздействия на станки и вызываемые ими отказы

На элементы работающего в цехе станка действуют нагрузки и окружающая среда. Среда состоит из группы материалов и группы энергий. Нагрузки на механические элементы станка представляют собой силы, которые определяются, силами резания, трения в кинематических парах и инерции перемещающихся элементов. На элементы электрической или электронной системы действуют нагрузки в виде электрического напряжения. Нагрузки подвержены случайным колебаниям (рис. 2.1). «Выбросы» нагрузки  $P$  за предельно допустимый уровень  $P_0$  возникают в случайные моменты времени. Если не приняты специальные меры, «выброс» обычно приводит к отказу какого-либо элемента системы.

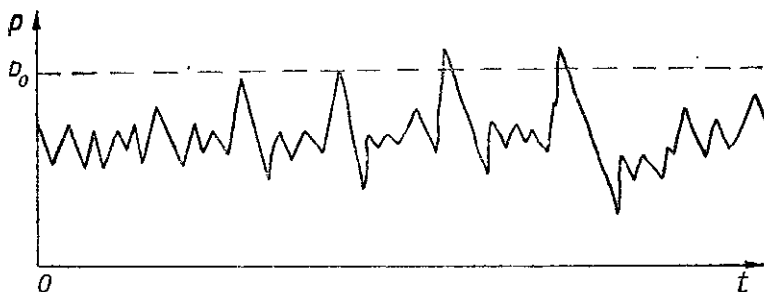


Рис. 2.1. Характер изменения нагрузки на элементы станка

Со стороны среды на станок действует поток электромагнитной энергии (радиоволн), который может влиять на работоспособность электронной аппаратуры. Между станком и средой происходит постоянный обмен тепловой энергией. Изменение температуры сильно влияет на работоспособность станка в целом и всех его элементов. Механическая энергия в виде вибраций передается данному станку от других работающих машин.

Между станком и средой существует также поток материалов. Например, вода и некоторые вещества, содержащиеся в атмосфере цеха, иногда вызывают коррозию деталей станка. Пыль, состоящая из частиц металлов и их окислов, частиц кварца и органических соединений, оседает на трущиеся детали и ускоряет их износ (например, в одном из цехов МТЗ на  $1 \text{ м}^2$  поверхности выпадает за час 30 мг пыли). Смазочно-охлаждающая жидкость может нарушить работоспособность электрической аппаратуры, например конечных переключателей.

События, в результате которых ухудшается работоспособность станка, могут быть разделены на две группы. Первую группу образуют события, которые представляют собой повреждения деталей и сопряжений, нарушения регулировок и взаимного положения деталей, отказы системы управления. Ко второй группе относятся события, заключающиеся в выходе какого-либо параметра (обычно точности) за допустимые пределы.

В результате события первой группы станок останавливается, перестает функционировать как машина. Этот отказ называется *отказом функционирования*. Он может возникать внезапно, скачкообразно (разрушения от усталости, от перегрузки, от заедания) или постепенно (в результате старения, коррозии).

После события второй группы станок продолжает работать как машина, но обработанные детали не удовлетворяют техническим условиям или же производительность станка снижается до недопустимого уровня. Это нарушение работоспособности называется *отказом по параметру*. Отказ по параметру является результатом изнашивания ответственных деталей, коробления базовых деталей и нарушения регулировок. Он накапливается постепенно. Иногда он бывает и внезапным, например в результате удара. Отказ по параметру обнаруживается измерением размеров обработанных деталей и устраняется ремонтом или регулировкой.

По причине возникновения отказы можно разделить на конструктивные, технологические и эксплуатационные (табл. 2.1).

**Т а б л. 2. 1. Распределение числа отказов и времени их устранения у автоматических линий ЛМ 169 и ЛМ 215**

Отказ	Причина возникновения отказа	Число отказов, %		Время устранения отказов, %	
		ЛМ169	ЛМ215	ЛМ169	ЛМ215
Конструктивный	Недостатки конструкции	10	28	21	28
	Недостаточный уровень надежности комплектующих изделий	22	6	11	12
Технологический	Дефекты изготовления и монтажа	6	14	14	22
	Дефекты режущего инструмента и заготовок	31	28	23	18
Эксплуатационный	Неправильные действия обслуживающего персонала	31	24	31	20

## 2. 2. Процессы, снижающие работоспособность станков

**Общие сведения.** Внешние и внутренние воздействия на части и системы вызывают в них протекание процессов, ухудшающих эксплуатационные показатели станка. В зависимости от скорости протекания все процессы можно разделить на три группы [34].

**Быстро протекающие процессы.** Эти процессы продолжаются в течение цикла работы станка и заканчиваются с его прекращением. К ним относятся колебания нагрузок, упругие деформации, вибрации узлов, изменения сил трения и др. Быстро протекающие процессы приводят к изменениям шероховатости поверхностей и рассеиванию размеров обработанных на станке деталей.

Металлорежущий станок является упругой системой. При нагружении силами его механические элементы деформируются, а при снятии нагрузок форма и размеры этих элементов полностью восстанавливаются. Это значит, что при изменении сил (в допустимых пределах) элементы деформируются упруго. Как известно, способность узла сопротивляться появлению упругих деформаций (отжати) под действием нагрузки называется жесткостью. Жесткость узла зависит от деформаций всех его деталей, а деталь может получить одновременно нес-



колько деформаций разного характера. Возникают деформации тела деталей (шпинделя, станины и др.), их поверхностей, контактные деформации тел, у которых начальный контакт представляет линию или точку. Жесткость — важнейшая составляющая качества станков. Она в значительной мере определяет точность и производительность обработки.

Переменность сил резания, в основном являющаяся результатом колебания припуска, и переменность физико-механических свойств обрабатываемого материала приводят к рассеиванию точности обработки.

В станке могут возникать колебательные процессы (вибрации). Вибрации ухудшают шероховатость поверхностей обрабатываемых деталей (рис. 2.2), вызывают рассеивание размеров и поломки режущих инструментов снижают долговечность станка. Имеют место



Рис. 2.2. Следы вибраций на обработанной поверхности

*вынужденные колебания*, появляющиеся под действием внешней периодической силы, которая обусловлена прерывистостью процесса резания, дисбалансом вращающихся частей и другими причинами.

Так называемые *параметрические колебания* появляются тогда, когда внешняя сила постоянна, а жесткость обрабатываемой вращающейся детали изменяется за время оборота, например из-за наличия шпоночной канавки. В токарных, расточных, шлифовальных и других станках, работающих на высоких режимах, возникают *автоколебания*, вызванные процессом резания.

Переменность сил трения в подвижных соединениях также влияет на точность обработки, например, вызывает рассеивание межосевых расстояний отверстий, обработанных на координатно-сверлильном станке.

Упругие деформации и колебания относятся к обратимым процессам, которые действуют временно.

**Процессы, протекающие со средней скоростью.** Эти процессы продолжаются в течение периода непрерывной

безотказной работы станка<sup>1</sup>, т. е. в течение нескольких минут или часов. К ним относятся изменения температуры станка, износ режущего инструмента.

Станок нагревается теплом, образующимся при работе его механизмов и в зоне резания. От работающего станка тепло отводится в окружающую среду. На отвод тепла влияют суточные и годовые колебания температуры в цехе. Иногда станок нагревается от окружающей среды, например падающими на него лучами солнца. В результате изменения температуры детали станка — станина, корпус, столы, ходовые винты, планшайбы, шпиндели — деформируются. При этом изменяются не только линейные размеры, но и геометрическая форма деталей, а узлы смещаются относительно друг друга..

Нагрев станка до температуры, при которой тепловые деформации его деталей становятся заметными и начинают влиять на его работоспособность, длится 1—8 часов после включения станка. В большинстве случаев температурные деформации узлов и деталей станков приводят к дополнительным погрешностям обработки. Это происходит, например, в том случае, когда деталь обрабатывается на автоматизированном станке и ее размеры определяются

упорами, кулачками или копирами, которые настраиваются в начале смены, на холодном станке. На рис. 2.3 показана температурная деформация стойки плоскошлифовального станка, вызванная неравномерным нагревом ее потоком тепла из шпиндельной бабки. В результате этой деформации возникает непараллельность торцов изделия, достигающая 0,010—0,012 мм на 100 мм его длины [38].

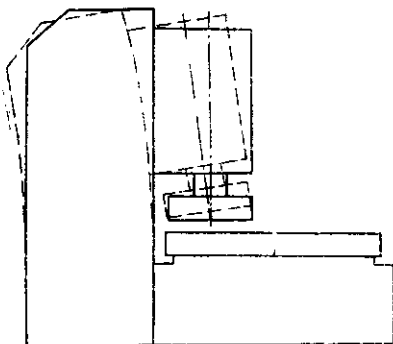


Рис. 2.3. Температурная деформация стойки плоскошлифовального станка

Нагрев станка сопровождается также следующими нежелательными явлениями: уменьшением вязкости мас-

<sup>1</sup>Здесь имеется в виду отказ по параметру

ла в гидроприводе и соответствующим увеличением утечек, изменением длительности цикла, а иногда и полным его нарушением. Изменения температуры приводят и к изменениям вязкости смазочных масел, а следовательно, условий смазки и трения. Температурные деформации деталей станка и изменения вязкости масла относятся к обратимым процессам.

Процессы, характеризующиеся средними скоростями, вследствие переменности условий, при которых они развиваются, являются случайными.

**Медленно протекающие процессы.** Эти процессы развиваются с начала эксплуатации станка, но их результаты становятся ощутимыми за периоды работы между ремонтами станка. К этим процессам относятся изнашивание основных деталей, перераспределение внутренних напряжений и вызываемое этим коробление ответственных деталей, коррозия, старение пластмасс, резины, рабочей жидкости, смазочных масел, электронной аппаратуры и др. Медленно протекающие процессы приводят к прогрессивному ухудшению технических характеристик станков, называемому *физическим старением*. Скорость старения определяется как первоначальным качеством станка, так и качеством обслуживания.

На работоспособность станка наиболее сильно влияет изнашивание его деталей. Изнашивание есть процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала и (или) его остаточной деформации. Результатом изнашивания является износ [10].

Преимущественное влияние износа на ухудшение эксплуатационных свойств станков можно объяснить большим количеством трущихся поверхностей, многие из которых трудно или невозможно защитить от пыли, стружки, смазочно-охлаждающей жидкости. Даже небольшой износ основных деталей иногда выводит станок из строя. Он приводит станки к отказам в результате потери точности элементов, участвующих в образовании формы обрабатываемой детали, и полной потере работоспособности некоторых из них. Износ снижает прочность деталей вследствие уменьшения их сечений, к. п. д. гидронасосов, гидродвигателей и увеличивает утечки в гидроагрегатах. Это также вызывает отказы станков. Вид изнашивания зависит от вида трения (скольжение, качение, качение с

проскальзыванием), наличия смазки на изнашивающихся деталях и других условий [47].

А б р а з и в н о е и з н а ш и в а н и е происходит в результате резания и царапания твердыми (абразивными) частицами. Абразивные частицы содержатся в пыли, смазочном масле, рабочей жидкости. Они представляют собой частицы кварца, притирочных паст, окалины, твердые структурные составляющие трущихся материалов, а также продукты изнашивания, которые стали твердыми в результате наклепа. Абразивный износ наблюдается на направляющих (рис. 2.4) и подшипниках сколь-

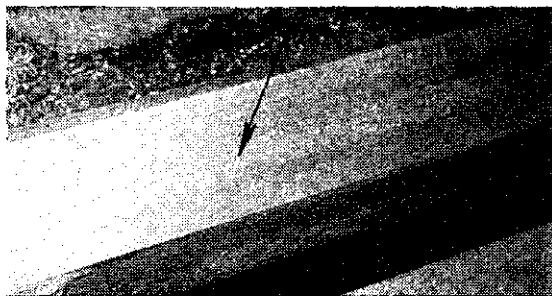


Рис. 2.4. Абразивный износ направляющей (указан стрелкой)

жения, в гидравлических цилиндрах, на штоках, плунжерах, ходовых винтах и других деталях. Для этого вида изнашивания линейный износ пропорционален удельному давлению на поверхности трения и пути трения.

Изнашивание при заедании возникает в результате того, что при трении поверхностей деталей они одновременно пластически деформируются с образованием абсолютно чистых участков (ювенильных поверхностей). В процессе молекулярного взаимодействия между чистыми металлическими поверхностями на некоторых участках происходит схватывание. Так как детали движутся относительно друг друга, узел схватывания разрушается, причем часто по основному металлу. В результате этого на одной из поверхностей появляется выступающая частица. Она, деформируясь, упрочняется и может сама разрушать поверхность: снимать стружку

или деформировать ее вследствие повышенных удельных давлений. Так возникают повреждения поверхностей в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения (рис. 2.5), называемые *задирами*.

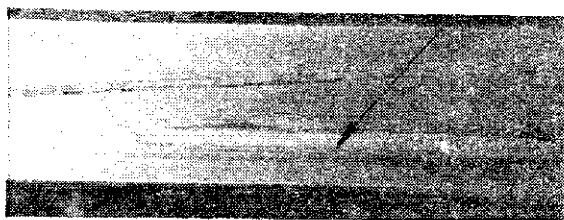


Рис. 2.5. Направляющая с задиром (задир указан стрелкой)

Образованию задиров способствуют высокие давления на трущихся поверхностях, загрязнения их твердыми абразивными частицами. Твердые частицы срезают поверхностные слои металла, покрытые защитными пленками, в результате чего появляются ювенильные поверхности. Кроме того, мелкие твердые частицы впиваются в значительное количество масла, предназначенного для смазывания трущихся поверхностей, что приводит к ухудшению смазки поверхностей.

Коррозионно-механическое изнашивание состоит из двух процессов: образования на трущихся поверхностях окисных пленок и постепенного истирания или срыва этих пленок. Поверхности окисляются кислородом, содержащимся в воздухе и смазках. Коррозионно-механическому изнашиванию подвергаются

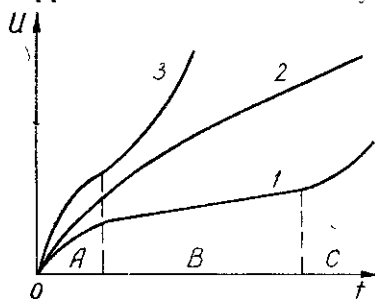


Рис. 2.6. Кривые износа деталей

направляющие станков, когда они смазываются маслами с противозадирными присадками. Эти присадки образуют с железом химические соединения, которые покрывают поверхности, предохраняя их от схватывания.

Рассмотрим ход нарастания износа  $u$  во вре-

мени (рис. 2.6). В период *A* детали прирабатываются: изменяются шероховатость и макрогеометрия поверхностей, а также физико-химические свойства поверхностных слоев. Длительность приработки определяется первоначальной шероховатостью сопряженных поверхностей, материалом деталей, удельным давлением. Шероховатость становится оптимальной, почти не зависящей от начальной. Для увеличения долговечности деталей следует добиваться уменьшения износа в этом периоде. После приработки для большинства деталей наступает период нормального износа (*B* на кривой *I*), когда условия изнашивания приближенно постоянны. В

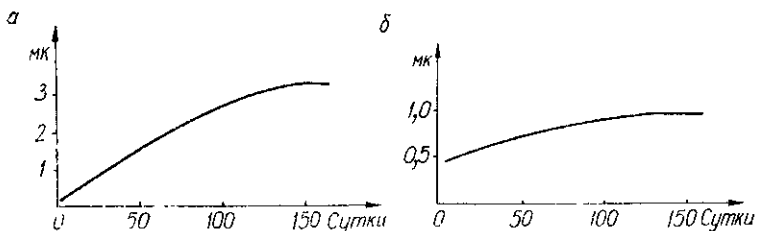


Рис. 2.7. График изменения бочкообразности (*a*) и овальности (*б*) деталей, шлифованных на станке, в результате перераспределения внутренних напряжений

результате износа изменяется форма деталей, увеличиваются зазоры в сопряжениях, ухудшаются условия трения и наступает период усиленного износа *C*. Встречаются отклонения от рассмотренной схемы (кривые 2 и 3).

Другим медленно протекающим процессом в станках является коробление деталей вследствие перераспределения остаточных напряжений, возникших в деталях при их изготовлении. Известно, что методами естественного и искусственного старения удастся снять внутренние напряжения в деталях, но, к сожалению, не полностью. По крайней мере в деталях станка остается до 20% первоначальных внутренних напряжений. При работе станка оставшиеся напряжения перераспределяются. Этому способствуют внешняя нагрузка и воздействие тепла. В результате детали коробятся, узлы смещаются относительно друг друга, точность станка снижается. На рис. 2.7, *a*, *б* показано изменение точности обработки деталей на бесцентрово-шлифовальном станке

особо высокой точности модели ЗВ182, происходящее вследствие его естественного старения (перераспределения внутренних напряжений в деталях). На основании полученных графиков можно утверждать, что форма деталей и положение узлов стабилизировались только через полгода после изготовления станка [40].

### 2.3. Разрушения деталей станков

Металлорежущие станки нередко отказывают вследствие разрушения их деталей (рис. 2.8, а—д). Для проектирования долговечных станков необходимо знать причины этих разрушений. В предыдущем параграфе мы рассмотрели некоторые виды износа. Теперь кратко оста-

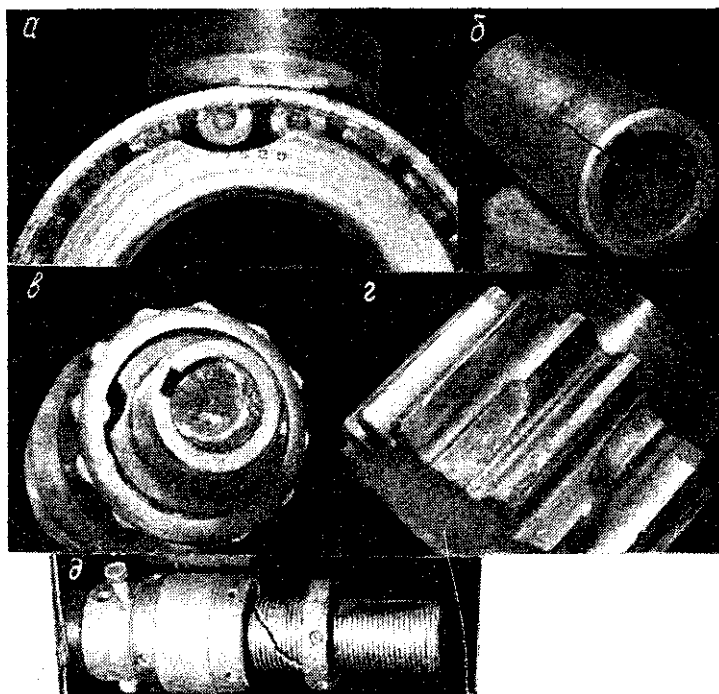


Рис. 2.8. Повреждение детали станков:  
а — кольцо роликоподшипника; б — полумуфта; в — вал; г — шестерня;  
д — патрон

новимся на других разрушениях деталей: пластических деформациях, усталостных поломках, усталостных разрушениях поверхностей [14, 36].

**Пластические деформации.** Когда контактное напряжение выше допустимого, контактные поверхности деталей сминаются, т. е. пластически деформируются. По этой причине выходят из строя шпонки, валы (смятие шпоночных канавок и шлицов), штифты, резьбовые, зажимные и крепежные детали. Иногда при чрезмерных напряжениях пластически деформируется тело детали, например вытягиваются винты, искривляются оси и валы.

**Усталостные поломки.** При действии переменных напряжений могут появляться усталостные поломки деталей даже в том случае, когда напряжения в деталях ниже предела текучести.

Усталостное разрушение начинается с появления трещины усталости. Трещина возникает у поверхности детали возле какого-либо дефекта, являющегося концентратором напряжения. Дефектами поверхностного слоя детали являются шлифовочные трещины и ожоги, зерна остаточного аустенита, риски от механической обработки, забоины, коррозионные раковины, неметаллические включения. Место, где зародилась усталостная трещина, называется *фокусом излома*. Под действием переменной нагрузки трещина медленно распространяется в глубь тела детали, образуя зону усталостного развития. На изломе эта зона имеет ступеньки, рубцы. Когда уцелевшее сечение тела становится малым, деталь ломается. Из-за усталостных поломок могут выходить из строя зубчатые колеса, валы, пружины, винты.

**Усталостное выкрашивание.** Этот вид разрушения характерен для контактных поверхностей зубчатых колес, тел качения и беговых дорожек шариковых и роликовых подшипников, шаров винтовых пар качения. На рис. 2.9 показана по-



Рис. 2.9. Шар подшипника, вышедший из строя в результате усталостного разрушения поверхностного слоя



верхность шара подшипника. Шар потерял работоспособность в результате усталостного выкрашивания поверхностного слоя.

Усталостное выкрашивание имеет место при трении качения, при качении со скольжением, а иногда и при скольжении. Выкрашивание начинается с появлением усталостных трещин, которые зарождаются в тех местах контактных площадок, где имеются дефекты микроструктуры или концентраторы напряжений. На развитие процесса влияет смазка, которая проникает в образовавшиеся трещины и расклинивает их при нагружении поверхностей. Развитие трещины, протекающее при пульсационном действии контактных давлений, приводит к усталостному выкрашиванию, т. е. к выламыванию кусочков металла из поверхностного слоя детали.

Первоначальные оспины (питтинги) могут залечиваться в результате наклепа и соответствующего повышения предела усталостного выкрашивания, а также в результате снижения контактного давления в условиях выглаживания поверхностей и снижения контактного давления. В случае прогрессирующего выкрашивания первоначальные питтинги не залечиваются, а все время развиваются, и с течением времени на поверхности детали образуются крупные оспины.

Основными мероприятиями, предотвращающими поверхностную усталость, являются повышение твердости поверхностей, снижение удельных нагрузок и недопущение концентраторов напряжений в поверхностном слое детали.

#### **2. 4. Изменение показателей качества станков во времени**

Для примера на рис. 2. 10 изображена схема изменения во времени одного из показателей качества станка — точности обработанных на нем деталей [44]. По оси абсцисс отложено время работы станка  $t$ , по оси ординат — погрешность обработки  $\Delta$ .

Даже при отсутствии всех описанных в предыдущих параграфах процессов, которые снижают качество станка, имеет место погрешность обработки  $\Delta_0$ . Ее величина определяется качеством проектирования и изготовления станка и остальных элементов технологической си-

стемы, т. е. их начальными параметрами. Совокупности станков данной модели свойственно рассеивание начальных параметров, которое и определяет случайный характер начальной погрешности обработки. Плотность распределения начальной погрешности обозначена через  $\varphi_0$ .

Процессы, протекающие быстро—в течение секунд или долей секунды, увеличивают начальную погрешность на величину  $\Delta_1(t)$  и приводят к распределению размера  $\varphi_1$ .

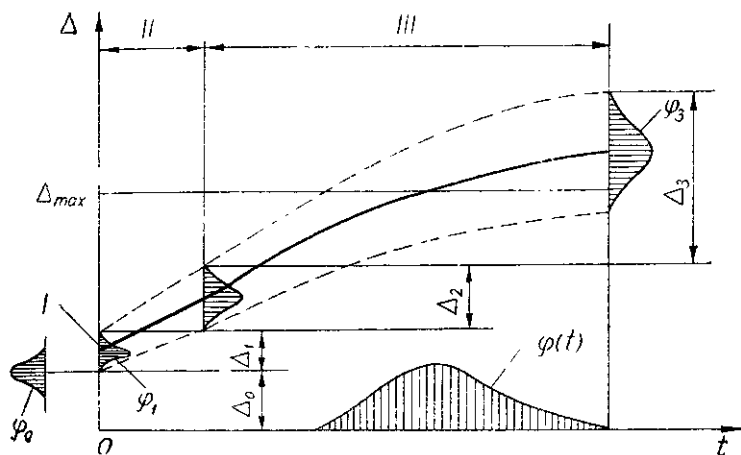


Рис. 2. 10. Изменение во времени точности обрабатываемых на станке деталей. I, II, III — соответственно результаты процессов, протекающих быстро, со средней скоростью и медленно

Влияние процессов средней скорости, протекающих в течение нескольких минут или часов, сказывается в дополнительном увеличении погрешности обработки на величину  $\Delta_2(t)$ . Этими процессами определяется распределение размера  $\varphi_2$ .

Через большие промежутки времени — недели, месяцы, годы — сказывается влияние медленно протекающих процессов: погрешность обработки увеличивается на  $\Delta_3(t)$ . Процессы этого вида приводят к распределению размера  $\varphi_3$ .

Пусть  $\Delta_{\text{ф}}$  и  $\Delta_{\text{max}}$  соответственно фактическое и предельное значения погрешности обработки. Разность  $\delta_{\text{т}} = \Delta_{\text{max}} - \Delta_{\text{ф}}$  называется *резервом точности станка*. Она

равна части поля допуска на контролируемый размер, которая может быть израсходована в результате медленно протекающих процессов. Время эксплуатации станка, по истечении которого достигается максимальная погрешность  $\Delta_{\max}$ , имеет плотность распределения  $\varphi(t)$ .

Промежуток времени, к концу которого заметно сказывается влияние процессов средней скорости, обычно представляет собой *межналадочный период*. Вероятность того, что к концу межналадочного периода погрешность обработки будет не больше предельно допустимой  $\Delta_{\max}$ , может быть определена по формуле

$$P_n(t) = 0,5 + \Phi\left[3\left(1 + \frac{\delta_r}{a}\right)\right], \quad (2.1)$$

где  $\Phi$  — функция Лапласа;

$\delta_r$  — резерв точности, которым обладает станок;

$a$  — половина зоны рассеивания размеров к концу межналадочного периода:

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{A_n^2 + A^2 + A_c^2}, \quad (2.2)$$

где  $A_n$  — зона рассеивания погрешностей настройки;

$A$  — зона рассеивания размеров обработанных деталей в результате быстро протекающих процессов;

$A_c$  — зона рассеивания размеров деталей, возникающего в результате действия процессов средней скорости.

Величина  $P_n(t)$  есть функция времени бесподналадочной работы станка и характеризует так называемую *технологическую надежность станка*, под которой понимают его способность сохранять качественные показатели технологического процесса (в данном случае точность обработки) в течение заданного периода эксплуатации. Можно также сказать, что  $P_n(t)$  есть вероятность того, что к концу межналадочного периода не возникнет отказ станка по параметру. Величина  $P_n(t)$ , называемая *коэффициентом технологической надежности*, может быть определена по результатам кратковременных испытаний станка. Качество станка тем выше, чем больше коэффициент его технологической надежности.

## 2.5. Изменение параметра потока отказов металлорежущего оборудования во времени

Результатом сложных процессов, протекающих в различных системах станков и автоматических линий, является изменение параметра потока отказов в зависимости от времени эксплуатации оборудования.

В начале периода отладки станка или автоматической линии параметр потока отказов сравнительно большой. Это объясняется наличием в составе станка или линии дефектных элементов, неудовлетворительной регулировкой систем, иногда недостаточным знакомством обслуживающего персонала с новым оборудованием. В процессе отладки и приработки машин явно дефектные элементы выходят из строя, наладчики и ремонтники осваивают машины, производят необходимые регулировки, учатся предупреждать отказы и неисправности. В результате параметр потока отказов  $\omega$  снижается. Считают, что период отладки и приработки заканчивается, когда величина  $\omega$  становится практически постоянной:  $\omega = \omega^0 = \text{const}$ .

Уровень параметра потока отказов  $\omega_0$  обусловлен конструктивно-технологическими решениями, заложенными в данной модели станка или автоматической линии, а также влиянием процессов, протекающих быстро, и процессов средней скорости.

Второй период эксплуатации оборудования характеризуется небольшим возрастанием параметра потока отказов, что объясняется влиянием износа деталей, их поломками, нарушениями отрегулированного положения деталей.

Вследствие первого малого ремонта параметр потока отказов снижается до величины, несколько большей  $\omega_0$ . Такое поведение параметра потока отказов объясняется тем, что несмотря на плановые ремонты, выполняемые в соответствии с системой планово-предупредительного ремонта, с течением времени износ и старение металлорежущего оборудования нарастают.

Зигзагообразная кривая 1 (рис. 2.11), показывающая изменение величины  $\omega$  в зависимости от отработанного станком или автоматической линией времени и с учетом плановых ремонтов, может быть приближенно заменена плавной кривой 2.

Если за начало отсчета отработанного оборудованием времени  $t$  принять конец периода его отладки, зависи-

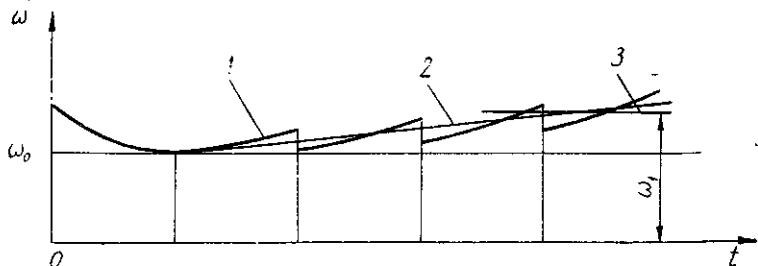


Рис. 2. 11. Изменение во времени параметра потока отказов станка или автоматической линии

мость  $\omega$  от  $t$  может быть описана следующим уравнением [24]:

$$\omega = \omega_0 \left[ 1 + \left( \frac{t}{\tau} \right)^m \right], \quad (2.3)$$

где  $\omega_0$  — значение параметра потока отказов при  $t=0$ ;  
 $\tau$  — период времени работы оборудования, в течение которого начальное значение параметра потока отказов  $\omega_0$  возрастает вдвое;  
 $m$  — показатель, постоянная величина ( $m \geq 1$ ).

Для примера на рис. 2. 12 показаны экспериментальные зависимости  $\omega(t)$  для некоторых моделей станков,

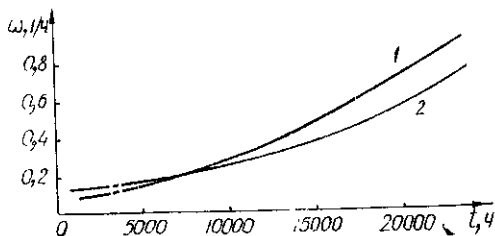


Рис. 2. 12. Изменение во времени параметра потока отказов:

1—токарных гидрокопировальных полуавтоматов модели 1722; 2—токарных вертикальных полуавтоматов модели 1282

подтверждающие возрастание  $\omega$  с ростом отработанного ими времени [29].

При решении многих практических задач кривую 2 (см. рис. 2. 11) приближенно заменяют горизонтальной

прямой 3, проходящей через точку с ординатой  $\omega = \omega_1$ . Величина  $\omega_1$  представляет усредненное значение параметра потока отказов, полученное по результатам кратковременных обследований нескольких единиц однотипного оборудования в условиях эксплуатации. Поскольку для некоторого периода эксплуатации значение параметра потока отказов принимают постоянным, значительно упрощается решение многих задач. При постоянном  $\omega$  поток отказов подчиняется наиболее простому распределению — экспоненциальному. Встречаются случаи, когда необходимо пользоваться не приближенной экспоненциальной, а реальной зависимостью  $\omega = \omega(t)$ . Например, в задачах по определению оптимального срока службы и оптимальной начальной величины параметра потока отказов.

Изменение параметра потока отказов некоторых систем станка и автоматической линии соответствует более простой, так называемой классической модели, которая изображена на рис. 2. 13. Различают три этапа работы ремонтируемого изделия. На этапе *A*, называемом пе-

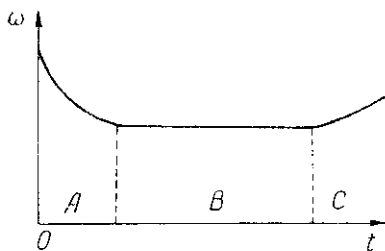


Рис. 2. 13. Классическая модель изменения параметра потока отказов

риодом приработки, параметр потока отказов уменьшается и к концу стабилизируется. Этот этап характеризуется теми же процессами, которые описаны для аналогичного этапа работы металлорежущего оборудования. За относительно коротким первым этапом следует продолжительный период нормальной эксплуатации *B* с постоянной величиной параметра потока отказов  $\omega$ , следовательно, с экспоненциальным распределением их. На этапе *C* величина  $\omega$  возрастает главным образом вследствие износа и старения элементов изделия.

### **Глава 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

#### **3.1. Общая схема обеспечения надежности при проектировании [22]**

Проектирование включает разработку технического задания, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, изготовление опытного образца или опытной партии.

В настоящее время показатели надежности предусматриваются в технических заданиях на проектирование некоторых типов металлорежущих станков и автоматических линий. В дальнейшем нормирование надежности металлорежущего оборудования будет применяться более широко. Для каждого типа оборудования должна быть обоснована номенклатура показателей надежности исходя из существующих стандартов (ГОСТ 13377—67, ГОСТ 16503—70 и др.), отраслевой документации, опыта предыдущих разработок и эксплуатации аналогичных изделий. В техническое задание необходимо включать минимальное число показателей надежности. Некоторые соображения по обоснованию их номенклатуры изложены в параграфе 3.2.

При разработке технического задания устанавливаются уровни (нормы) надежности. Они должны быть не слишком низкими и не слишком высокими, так что приходится решать задачу по оптимизации уровня надежности (обычно по экономическому критерию) [24]. На этом этапе устанавливают методы оценки действительного уровня надежности изделия, в том числе при приемодаточных и государственных испытаниях.

Исходя из требуемого уровня надежности изделия при разработке технического предложения определяют требования к надежности комплектующих элементов и разрабатываются предложения по повышению надежности некоторых из них. Эскизный проект может включать теоретическое исследование надежности различных вариантов изделия и, как следствие, выбор наиболее целе-

сообразного конструктивно-технологического варианта. При решении этой задачи используются результаты испытаний и эксплуатации аналогичных изделий.

На этапе технического проектирования производится уточненный расчет надежности выбранного варианта изделия. При этом используются структурная схема изделия, данные о надежности комплектующих элементов и методика расчета уровня надежности. В этот период производятся испытания комплектующих элементов в целях уточнения уровня их надежности, а также испытания (обычно на износостойкость) образцов материалов, применяемых для изготовления наиболее ответственных деталей (направляющих станков, шпинделей, ходовых винтов, гаек, подшипников скольжения). Испытаниями выявляют также влияние различных вариантов конструкции и технологии изготовления на надежность отдельных ответственных деталей и сопряжений. Опытный образец изделия подвергают испытаниям в целях определения качества функционирования и уровня эксплуатационных характеристик (жесткости, виброустойчивости, геометрической точности и т. д.). Затем проводятся стендовые испытания опытного образца в условиях имитирующих эксплуатационные. Чтобы быстро получить информацию о надежности образца, применяют различные методы ускорения испытаний. Анализ причин отказов образца позволяет разработать рекомендации по их устранению.

### **3.2. Выбор показателей надежности металлорежущего оборудования**

За количественные характеристики надежности станков и автоматических линий выбираются показатели из списка, установленного ГОСТом 16503—70. Можно взять и нестандартные показатели, если они отражают специфику отрасли лучше стандартных.

Перечень показателей надежности, выбираемых для оборудования того или иного типа, определяется рядом условий. Во-первых, перечень включает как показатели безотказности и долговечности, так и ремонтпригодности. Во-вторых, стремятся выбирать такие показатели, которые можно оценить на стадии проектирования машин, а также проверить в процессе эксплуатации. По-



следнее связано с наличием методов и устройств для учета наработки. В-третьих, выбранные показатели надежности должны быть удобны для применения.

Для изучения простоев неавтоматизированных станков часто не удается использовать счетчики наработки, а время простоев определяется со слов мастеров и рабочих, эксплуатирующих данные станки, и по технической документации. Поэтому оценивается только время работы станка в годах или месяцах двухсменной работы за некоторый период. Это время называется *приведенным сроком службы станка*  $T_{п.с.}$ :

$$T_{п.с.} = T_n - T_{п.р.} - T_{п.о.},$$

где  $T_n$  — номинальный фонд времени за рассматриваемый период;

$T_{п.р.}$  — время простоев станка за этот период из-за ремонтов;

$T_{п.о.}$  — время длительных простоев станка за этот период по организационным причинам (длительное отсутствие рабочего, заготовок и т. д.).

Показателями долговечности неавтоматизированных станков являются срок службы до выхода за пределы норм точности  $T_t$ , срок службы до первого среднего ремонта  $T_c$  и срок службы до первого капитального ремонта  $T_k$  [18]. Эти сроки соответственно равны приведенным срокам службы станка до выхода за пределы норм точности, до первого среднего и до первого капитального ремонтов.

Показателем безотказности неавтоматизированных станков является срок службы на один отказ  $T_o$  — среднее значение приведенного срока службы между двумя последовательными отказами. При определении  $T_o$  следует учитывать только отказы, появляющиеся в результате дефектов конструкции и изготовления станка, приводящих к износу и усталостному разрушению деталей.

Интервалы работы и простоев полуавтоматов, автоматов и автоматических линий можно записывать на бумажной ленте с помощью самопишущих приборов. Прибор присоединяется к контактам реле, которое находится во включенном состоянии в течение цикла машины и выключено в интервалах между циклами. По записям, произведенным на ленте, можно определить: наработку

за некоторый период эксплуатации  $T_p$ ; время простоев, вызванных профилактическими осмотрами, плановыми ремонтами и межремонтным обслуживанием  $T_{обсл}$ ; время простоев, вызванных отказами, которые произошли в результате недостатков конструкции и изготовления станка  $T_{отк}$ . По этим данным легко вычислить показатели надежности.

За показатели долговечности автоматов и полуавтоматов можно принять ресурс до выхода за пределы норм точности  $R_T$ , ресурс до первого среднего ремонта  $R_c$ , ресурс до первого капитального ремонта  $R_k$ . Эти величины соответственно равны наработке станка до выхода за пределы норм точности, до первого среднего ремонта, до первого капитального ремонта.

К показателям безотказности автоматизированных станков относятся наработка на отказ  $T$  и вероятность безотказной работы за время  $t$ . При расчете  $T$  не должны учитываться плановые ремонты. Нарботка на отказ является показателем, удобным для проверки соответствия расчетного уровня надежности фактическому, определяемому при приемо-сдаточных испытаниях. Он не зависит от квалификации испытателей и организации испытаний. Вероятность безотказной работы за время  $t$  — важный показатель надежности станков, встраиваемых в автоматические линии, когда отказ данного станка во многих случаях приводит к отказу всей линии.

Показателями надежности автоматизированных станков являются коэффициент готовности  $K_g$  и коэффициент технического использования  $K_{т.и}$ . Знание этих показателей необходимо для расчета технической  $Q_T$  и общей  $Q_0$  производительности машины:

$$Q_T = \frac{60 m K_g}{\tau};$$

$$Q_0 = \frac{60 m K_{т.и}}{\tau},$$

где  $m$  — число деталей, обрабатываемых за один цикл действия машины;

$\tau$  — длительность цикла машины, мин.

За основные показатели надежности автоматических линий принимают наработку на отказ, среднее время восстановления, параметр потока отказов, коэффициенты

готовности и технического использования, вероятность безотказной работы. Для автоматических линий не вводятся показатели долговечности, так как в пределах интересующего потребителя срока службы (8—12 лет) первоначальная производительность и уровень надежности линий практически не уменьшаются.

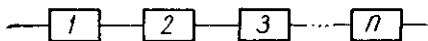
Тщательно отобранные для каждой модели оборудования показатели надежности должны быть включены в технические проекты, утверждены заказчиком при согласовании технического проекта и рассчитаны при проектировании оборудования. Эти показатели должны проверяться при приемо-сдаточных испытаниях и в эксплуатационных условиях.

### 3.3. Расчет вероятности безотказной работы системы

**Общие сведения.** Структура системы сильно влияет на ее надежность. Часто требуется рассчитать систему при известных показателях надежности ее элементов и структуре. Рассмотрим теоретические основы решения таких задач [20].

**Последовательное соединение элементов.** *Последовательным* (в смысле надежности) называют соединение

*а*



*б*

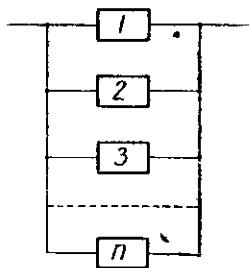


Рис. 3.1. Соединения элементов

элементов, при котором отказ одного из них приводит к отказу всей системы. Соединение элементов, расположенных последовательно в пространстве (рис. 3.1, *а*), что имеет место в электротехнике, гидроприводе, есть частный случай последовательного соединения. К системам с последовательным соединением элементов отно-

сятся, например, коробка скоростей станка, коробка подач, силовой стол, револьверная головка. При отказе любой шестерни, подшипника, вала и прочего эти узлы выходят из строя. Токарный станок в целом — система с последовательным соединением элементов (передняя и задняя бабки, станина, коробка подач, система подачи смазочно-охлаждающей жидкости и др.).

**Параллельное соединение элементов. Резервирование.** *Параллельным* называют соединение элементов, при котором их система отказывает только в случае отказа всех элементов.

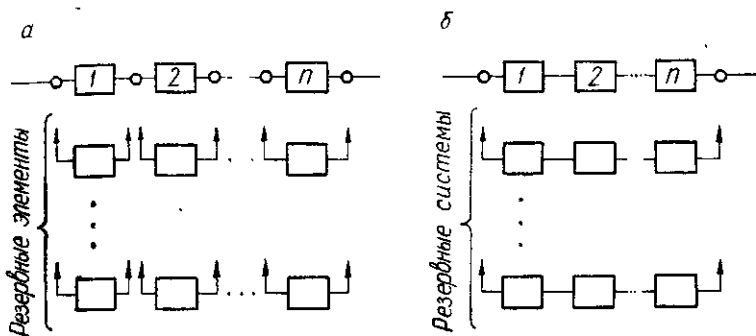


Рис. 3. 2. Ненагруженное резервирование:  
а—раздельное; б—общее

На рис. 3. 1, б изображено параллельное соединение. Элементы 2, 3, ...,  $n$ , являясь резервными, выполняют те же функции, что и элемент 1. Все они работают при одинаковом режиме. Система функционирует до тех пор, пока не откажут все элементы. Ясно, что надежность такой системы выше, чем системы, выполняющей те же функции и состоящей только из одного элемента 1. В стандарте [8] приводится следующее определение: «Метод повышения надежности путем введения резервных частей, являющихся избыточными по отношению к минимальной функциональной структуре изделия, необходимой и достаточной для выполнения им заданных функций, называется резервированием».

Резервирование, показанное на рис. 3. 1, б, называется *постоянным*, а на рис. 3. 2—*ненагруженным* (резервирование замещением). В случае ненагруженного ре-

резервирования резервные части отключены от системы и присоединяются к ней только в случае отказа основных частей. Ненагруженное резервирование бывает раздельным и общим. Раздельное резервирование цепи состоит в том, что при отказе любого ее элемента к системе присоединяется резервный элемент (рис. 3.2, а). Общее резервирование цепи состоит в том, что при отказе одного из ее элементов к системе присоединяется такая же резервная цепь, вместо отказавшей (рис. 3.2, б).

Примерами резервирования могут служить автоматическая смена затупившихся инструментов на металло-режущих станках, применение параллельных потоков в автоматических линиях и др.

**Независимость элементов в системах.** Элементы в системе называют *независимыми*, если отказ любого из них или группы элементов не влияет на вероятность отказа других элементов.

**Вероятность безотказной работы системы, состоящей из независимых элементов.** Пусть по результатам экспериментов или эксплуатационных наблюдений известны вероятности безотказной работы до момента  $t$  всех  $n$  элементов системы:  $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$ . Необходимо найти вероятность безотказной работы системы  $P(t)$ .

Рассмотрим три случая соединения элементов:

1) последовательное; 2) параллельное; 3) смешанное: в системе имеются последовательные и параллельные соединения элементов.

**Система последовательно соединенных элементов.** Обозначаем через  $A_1, A_2, \dots, A_n$  события, состоящие в безотказной работе за время  $t$  первого, второго, ...,  $n$ -го элементов системы;  $B$  — событие, состоящее в безотказной работе за это время всей системы.

Последовательная система не отказывает, если не отказал ни один из ее элементов. Поэтому

$$B = A_1 A_2 \dots A_n.$$

Так как элементы независимы, применяем теорему умножения вероятностей независимых событий

$$P(B) = P(A_1)P(A_2)\dots P(A_n)$$

и получаем

$$P(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t).$$

Так как  $P_i(t) < 1$ , вероятность безотказной работы последовательной системы тем ниже, чем больше элементов входит в нее.

Система параллельно соединенных элементов. Обозначаем через  $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \dots, \bar{A}_n$  события, состоящие в отказе за время  $t$  первого, второго, ...,  $n$ -го элементов системы; через  $\bar{B}$  — событие, состоящее в отказе за это время всей системы.

Параллельная система отказывает, когда отказывают все ее элементы. Поэтому

$$\bar{B} = \bar{A}_1 \bar{A}_2 \dots \bar{A}_n.$$

Так как элементы независимы,

$$P(\bar{B}) = P(\bar{A}_1) P(\bar{A}_2) \dots P(\bar{A}_n)$$

Известно, что

$$P(A_i) + P(\bar{A}_i) = 1;$$

$$P(B) + P(\bar{B}) = 1.$$

Поэтому

$$1 - P(B) = [1 - P(A_1)] [1 - P(A_2)] \dots [1 - P(A_n)]$$

или

$$P(t) = 1 - [1 - P_1(t)] [1 - P_2(t)] \dots [1 - P_n(t)].$$

Из формулы следует, что вероятность безотказной работы параллельной системы тем выше, чем больше элементов в нее включено.

**Пример.** Система состоит из четырех параллельно включенных элементов. Вероятность безотказной работы их в течение 100 ч одинакова и равна  $P_i(100) = 0.9$ . Вероятность безотказной работы системы  $P(100) = 1 - [1 - P_i(100)]^4 = 1 - (1 - 0.9)^4 = 0.9999$ , т. е. значительно выше, чем для одного элемента. В течение 100 ч будет отказывать в среднем каждый десятый элемент и в то же время только одна система из десяти тысяч.

Смешанная система состоит из подсистем, представляющих последовательные и параллельные соединения элементов (рис. 3.3).

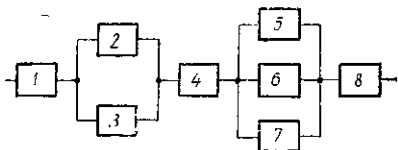
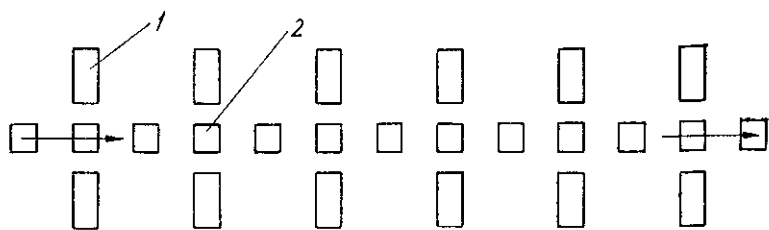
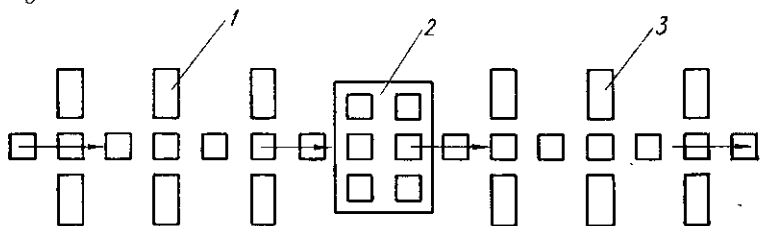


Рис. 3.3. Смешанная система

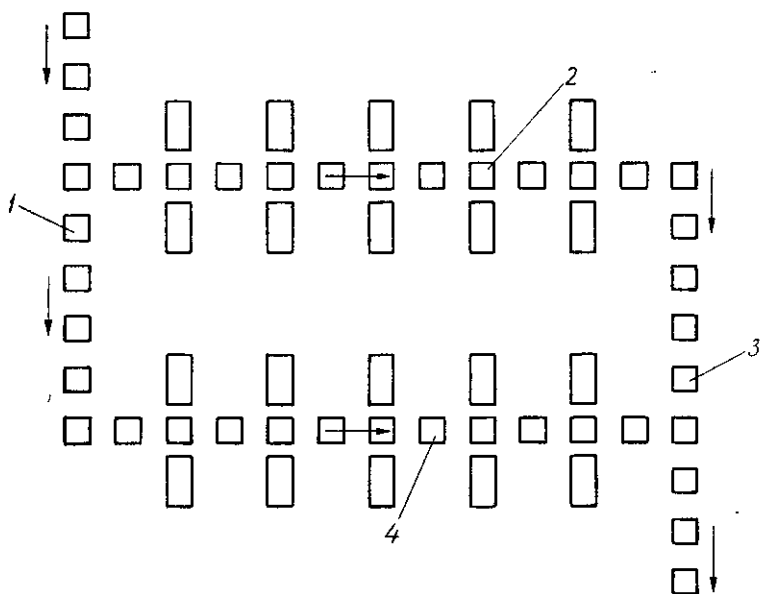
*a*



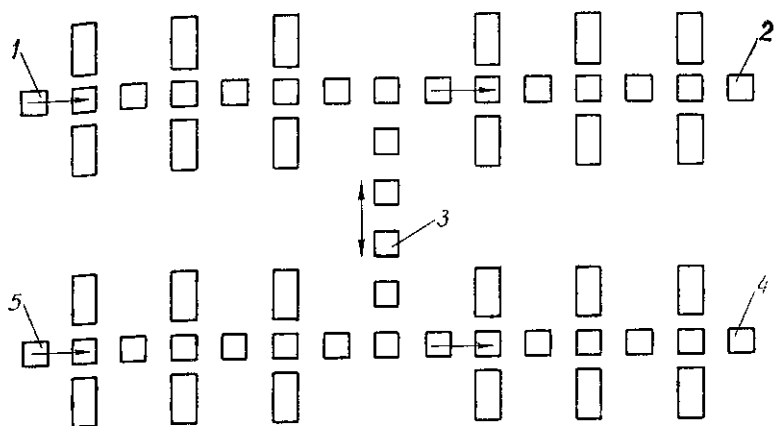
*б*



*в*



2



в

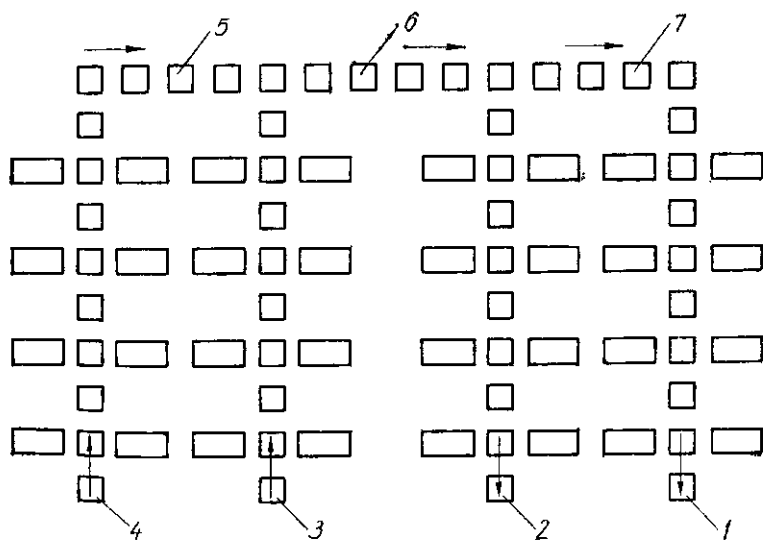


Рис. 3. 4. Автоматические линии



При расчете вероятности безотказной работы системы сначала необходимо определить вероятность безотказной работы подсистем, являющихся параллельными соединениями, а затем — вероятность безотказной работы системы  $P(t)$  как произведение вероятностей безотказной работы всех подсистем. Например, для системы, изображенной на рис. 3.3, получаем

$$P(t) = P_1(t) \{1 - [1 - P_2(t)] [1 - P_3(t)]\} \times \\ \times P_4(t) \{1 - [1 - P_5(t)] [1 - P_6(t)] [1 - P_7(t)]\} P_8(t).$$

Следовательно, если известны вероятности безотказной работы элементов и структура системы, легко найти вероятность безотказной работы системы за определенное время.

Выбор рациональной структуры — важное направление обеспечения требуемого уровня надежности автоматических линий, электро- и гидросхем металлорежущего оборудования [6, 12]. Наряду с резервированием применяются и другие методы повышения надежности систем путем выбора рациональной структуры. Рассмотрим примеры.

На рис. 3.4, а изображена схема заблокированной автоматической линии, включающей станки 1, транспортное устройство 2 и др. Она представляет цепь автоматически действующих агрегатов, в которой при отказе одного из них останавливается вся линия. Если в заблокированную линию соединено много станков, потери времени на устранение отказов оборудования и инструментов становятся большими, а фактическая производительность намного меньше номинальной. При большом количестве станков коэффициент готовности заблокированных линий мал.

На рис. 3.4, б показана линия, состоящая из двух секций 1 и 3 и накопителя деталей 2 между ними. При отказе секции 3 секция 1 продолжает работать, и обработанные на ней заготовки поступают в накопитель. В случае отказа секции 1 секция 3 обрабатывает заготовки, поступающие из накопителя. Нормальное функционирование линии заключается в одновременной работе двух секций. Фактическая производительность линии с такой структурой выше производительности заблокиро-

ванной линии с той же номинальной производительностью.

На рис. 3.4, в показана двухпоточная автоматическая линия. Заготовки с подающего транспортера 1 поступают на два одинаковых потока 2 и 4, которые могут работать (или простаивать) одновременно или по одному. Обработанные детали выдаются на транспортер 3. Коэффициент готовности такой линии выше, чем сблокированной двухручьевой с той же номинальной производительностью.

По сравнению с этой сблокированной линией надежность двухпоточной двухсекционной линии будет выше (рис. 3.4, г). При нормальной работе линии детали с секции 1 поступают на секцию 2, а с секции 5 — на секцию 4. Если отказала, например, секция 2, то останавливается и секция 1, но секции 5 и 4 продолжают работать. Если теперь откажет секция 5, обработка будет производиться так: детали обрабатываются в секции 1 первого потока, реверсивным транспортером 3 передаются для дальнейшей обработки на секцию 4 второго потока.

На рис. 3.4, д изображена еще одна структура многопоточных линий. Здесь детали с двух одинаковых параллельных потоков 3 и 4 с помощью транспортеров 5, 6 и 7 поступают для дальнейшей обработки на два одинаковых потока 1 и 2.

### 3.4. Методы расчета показателей надежности станков и автоматических линий

**Общие сведения.** Чрезвычайно важно уметь рассчитывать показатели надежности станка или автоматической линии на стадии их проектирования. Располагая этими показателями, можно определить фактическую производительность проектируемого оборудования, наиболее точно рассчитать срок окупаемости, выбрать оптимальную компоновку, ввести для станков, автоматических линий и их узлов нормы показателей надежности.

В настоящее время разработаны методы расчета показателей надежности некоторых типов металлорежу-

щего оборудования. Сущность их сводится к следующему.

1. Станок или автоматическую линию мысленно разделяют на элементы. Количество элементов каждого типа, входящих в данную машину, можно определить по чертежам общих видов, по кинематическим, гидравлическим и электрическим схемам. В одних методиках элементами считают большие узлы: силовые столы, транспортные устройства, поворотные делительные столы и т. д. В других — за элементы принимают более мелкие узлы: насос, реле давления, электродвигатель, подшипник качения и т. д.

2. В результате обработки статистического материала, собранного при обследовании ранее изготовленного аналогичного оборудования, находят показатели надежности элементов каждого типа. Для этого иногда выполняются дополнительные эксперименты. Таким образом, приступая к расчету показателей надежности нового оборудования, конструктор располагает статистическими показателями надежности его элементов.

3. По количеству элементов каждого типа, статистическим показателям их надежности и структуре машины рассчитываются показатели ее надежности.

**Расчет коэффициента готовности заблокированных автоматических линий [4].** Коэффициент готовности таких линий определяется по формуле (1.35).

Разделив числитель и знаменатель на  $T$ , получим

$$K_r = \frac{1}{1 + \frac{T_b}{T}} = \frac{1}{1 + B_0}. \quad (3.1)$$

Величина  $B_0$  равна времени простоев оборудования из-за устранения отказов, приходящемуся на одну минуту его бесперебойной работы, и называется *удельной длительностью настройки*. Эту величину, а следовательно, и  $K_r$  можно рассчитать на стадии технического проектирования, учитывая, что удельная длительность настройки заблокированной линии равна сумме удельных длительностей настройки всех ее элементов.

Все устройства линии разделены по функциональному признаку на следующие группы: инструменты, приспособления, механическое оборудование, электричес-

кое оборудование, гидравлическое оборудование, транспортеры и перегружатели, бункера. Индексы групп соответственно: *И, П, М, Э, Г, Т, Б*, а в общем виде *i*.

$$B_0 = B_{\text{и}} + B_{\text{п}} + B_{\text{м}} + B_{\text{э}} + B_{\text{г}} + B_{\text{т}} + B_{\text{б}}. \quad (3.2)$$

Здесь  $B_i$  — удельная длительность настройки элементов *i*-й группы. В каждой группе при определении  $B$  учитываются не все элементы, а только некоторые, типовые. Например, в группе «механическое оборудование» за типовые элементы приняты подшипники качения, зубчатые передачи, винтовые передачи, пары типа направляющих, пары типа ролик-кулачок, муфты сцепления. Для типовых элементов каждой группы по результатам обследования тринадцати автоматических линий были найдены баллы удельной длительности настройки  $h_i$ . Зная  $h_i$ , можем вычислить удельную длительность настройки группы  $B_i$ :

$$B_i = a_i \left[ \sum_s (n_i h_i)_s + \frac{1}{\tau} \sum_k (n_i h_i)_k \right], \quad (3.3)$$

где  $a_i$  — коэффициент, характеризующий квалификацию наладчиков и ремонтников;

$n_i$  — число элементов данного типа;

$\tau$  — средняя длительность цикла автоматической линии.

Первая сумма в квадратных скобках относится к непрерывно действующим элементам данной группы, а вторая — к работающим циклически.

**Пример.** Гидравлическое оборудование автоматической линии состоит из 20 насосов, 35 панелей, 45 цилиндров, 60 клапанов, 30 золотников, 40 дросселей, 55 реле давления. Из них 15 клапанов, 45 реле давления, все золотники, панели, цилиндры работают циклически. Время цикла  $\tau = 2$  мин. Найти удельную длительность настройки гидравлического оборудования этой линии, если  $a_{\text{г}} = 2,6$ . Баллы удельной длительности настройки гидравлического оборудования следующие:

элементы $h_i \cdot 10^4$	клапаны	0,2
насосы 1	золотники	0,2
панели 1,5	дроссели	0,2
цилиндры 1,1	реле давления	0,2

По формуле (3.3) имеем

$$B_{\text{г}} = 2,6(20 \cdot 1 + 45 \cdot 0,2 + 40 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,2) \cdot 10^{-4} + 2,6 \cdot \frac{1}{2} \times \\ \times (35 \cdot 1,5 + 45 \cdot 1,1 + 15 \cdot 0,2 + 30 \cdot 0,2 + 45 \cdot 0,2) \cdot 10^{-4} = 0,02574 \text{ мин/мин},$$

т. е. на каждую минуту бесперебойной работы линии приходится 0,02574 мин простоя по вине гидравлического оборудования.

Аналогично определяется удельная длительность настройки других групп за исключением инструментов. Для группы инструментов

$$B_{нi} = \frac{1}{\tau} \left[ \sum_{j=1}^n \left( \frac{t_{смj} t_{pj} \alpha_{пj} \alpha_{рj}}{T} \right)^{\alpha_j} + \sum_{k=1}^p \left( \frac{t_{смk} t_{pk}}{TN} \right)^{\alpha_k} \right], \quad (3.4)$$

- где  $t_{см}$  — длительность смены инструмента;  
 $t_{р}$  — время участия инструмента в цикле;  
 $\alpha_{п}$  — коэффициент на учет поломок инструментов;  
 $\alpha_{р}$  — коэффициент на учет регулировок инструментов;  
 $T$  — стойкость инструмента на режиме его применения в линии;  
 $N$  — число циклов, в течение которых вспомогательный инструмент используется однократно.

В этом выражении первая сумма относится к основным инструментам (о), вторая — к вспомогательным (в).

Справочные данные, необходимые для расчета по изложенной методике коэффициента готовности автоматических линий, имеются в книге [4].

В описанной методике элементы мелкие: подшипник, реле, насос и другие, поэтому расчеты иногда становятся громоздкими.

**Расчет показателей надежности оборудования, komponуемого в основном из нормализованных узлов.** В качестве элементов принимаются нормализованные узлы: поворотные столы, гидростанции, силовые столы, подкатные столы и другие, а также специальные узлы. Имеются два метода расчета показателей надежности.

Первый метод поясним на примере расчета коэффициента готовности сблокированных автоматических линий и агрегатных станков [25]. По описанной выше методике для нормализованных узлов находят формулы, выражающие удельную длительность настройки  $B_{нi}$  через длительность цикла работы  $\tau$ :

$$B_{нi} = a_i + \frac{b_i}{\tau}, \quad (3.5)$$

где  $i$  — номер узла;  
 $a_i, b_i$  — величины, постоянные для данного узла, характеризующие соответственно непрерывно и циклически действующие его элементы.

Для целого ряда узлов МЗАЛ расчетные формулы вида (3.5) приведены в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Удельные длительности настройки  $B$  некоторых нормализованных узлов МЗАЛ [24]

Наименование узла	Мощность привода главного движения, кВт	$B \cdot 10^5$ мин/мин
Электромеханические самодействующие поворотные столы УМ 4133 и УМ 4143	1,0	$95 + \frac{91}{\tau}$
Гидростанция	1,0	$63 + \frac{41}{\tau}$
Электромеханические ключи УМ 4525 и УМ 4526	0,5	$32 + \frac{38}{\tau}$
Привод поворота и фиксации барабана УМ 4331 и УМ 4313	1,7	$79 + \frac{189}{\tau}$
Фрезерная головка УМ 3651	10	$51 + \frac{87}{\tau}$
Подрезно-расточная бабка УМ 3432	4,5	$220 + \frac{190}{\tau}$
Силовой стол УМ 2464 и УМ 2474	2,8	$128 + \frac{154}{\tau}$
Силовая бабка УМ 2551	2,8	$10 + \frac{31}{\tau}$
Гидростанция смазки УМ 9672	0,18	$6 + \frac{34}{\tau} + \frac{18}{\tau} K^*$

\*  $K$  — число циклов работы оборудования, через которое включается электродвигатель гидростанции.

Для специальных узлов удельная длительность настройки вычисляется по методике расчета коэффициента готовности заблокированных автоматических линий. Для некоторых специальных узлов могут быть получены

и расчетные формулы. Например, для приспособлений, предназначенных для агрегатных станков конструкции СКБ АЛ с вертикальной осью поворота стола, получена зависимость [25]:

$$B_{\text{сп}} = \frac{1}{\tau} (10,8N + 21,8) 10^{-5} \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3,$$

где  $N$  — количество элементов, входящих в приспособление (базирующих, зажимных, направляющих и др.);

$\alpha_1$  — коэффициент, учитывающий точностные требования;

$\alpha_2$  — коэффициент, учитывающий материал обрабатываемой детали и характер стружки;

$\alpha_3$  — коэффициент, учитывающий ремонтпригодность приспособления и напряженность режима работы.

Удельная длительность настройки оборудования, скомпонованного в основном из нормализованных узлов, равна сумме удельных длительностей настройки этих узлов  $B_{\text{н}}$  и специальных узлов  $B_{\text{сп}}$ :

$$B_0 = \sum_i B_{\text{н}i} + \sum_j B_{\text{сп}j}. \quad (3.6)$$

Рассмотрим второй метод, применяемый для оценки показателей надежности автоматических линий [51]. Расчет основан на следующих утверждениях: параметр потока отказов сблокированной автоматической линии  $\omega_0$  равен сумме параметров потока отказов составляющих ее элементов  $\omega_i$ , а удельная длительность настройки линии  $B_0$  равна сумме удельных длительностей настройки элементов  $B_i$ .

Путем обследования находящихся в эксплуатации автоматических линий определены величины  $\omega_i$  и  $B_i$  для отдельных элементов (табл. 3.2 и 3.3). Используя эти характеристики, можно легко найти параметр потока отказов оборудования и удельную длительность настройки:

$$\omega_0 = \frac{\sum_i \omega_i}{\tau} + \sum_j \omega_j; \quad (3.7)$$

$$B_0 = \frac{\sum_i B_i}{\tau} + \sum_j B_j. \quad (3.8)$$

**Т а б л. 3. 2. Показатели надежности циклически действующих узлов автоматических линий МЗАЛ**

Наименование узла	$\omega \cdot 10^3$ , 1/цикл	$B \cdot 10^3$ мин/цикл
Силовой или подкатной стол: с многошпиндельной коробкой с подрезно-расточной или фрезерной бабкой	0,143 0,200	0,300 0,800
Приспособление для фиксации и зажима: заготовок средней сложности заготовок со сложными механизмами или для точной обработки	0,139 0,278	1,000 2,000
приспособлений-спутников (типовое)	0,100	0,500
Привод транспортного устройства с меха- низмом поворота штанг	0,588	4,000
Приспособление-спутник: без зажимного устройства с зажимным устройством	0,010 0,100	0,100 0,500
Станция зажима или отжима заготовок в приспособлениях-спутниках (механичес- кий ключ)	0,286	1,429
Станция автоматической загрузки или раз- грузки заготовок	2,000	0,400
Устройство для автоматической запрессовки колец или втулок в заготовки	0,100	0,100
Контрольные плиты подвижные	0,010	0,050
Устройство для контроля наличия отвер- стий в заготовках	0,200	2,000
Быстросменный патрон с удлинителем для крепления сверл, зенкеров, разверток, метчиков	0,001	0,002
Подрезная головка со скользящей втулкой (пинольная) и с плавающим патроном	0,010	0,100
Борштанга во вращающейся втулке или со скользящей втулкой и с плавающим па- троном	0,040	0,010
Станция для поворота заготовок или при- способлений-спутников, кантователь	0,100	1,000
Электрооборудование линии из 10 станков	1,000	7,500
Гидрооборудование линии из 10 станков (без насосных установок)	2,000	17,400
Возвратный транспортер	1,667	20,000
Моечная станция	0,100	1,000



**Т а б л. 3. 3. Показатели надежности непрерывно действующих узлов автоматических линий МЗАЛ**

Наименование узла	$\theta \cdot 10^3$ , 1 мин	$E \cdot 10^3$ , мин/мин
Система охлаждения режущего инструмента:		
без резервной насосной установки	0,400	0,200
при наличии резервной насосной установки	0,200	0,600
Насосная установка гидростанции	0,010	0,100

В этих формулах  $\tau$  — длительность цикла линии, первая сумма относится к циклически действующим узлам, вторая — к узлам, работающим непрерывно.

Выражения (1.30), (1.33) и (3.1) дают возможность определить для автоматической линии наработку на отказ, коэффициент готовности и формулу для вычисления вероятности безотказной работы.

**Об определении показателей надежности автоматических линий со сложной структурой.** Методы расчета показателей надежности линий, имеющих сложную структуру, основываются на математической теории массового обслуживания и оказываются сложными и громоздкими. Поэтому для таких линий разработаны приближенные методы расчета показателей надежности и фактической производительности [49]. Однако эти методы оказались недостаточно точными.

Практика показала, что наиболее подходящим методом для определения показателей надежности и производительности, а также оптимизации структур сложных автоматических линий является моделирование их на электронных вычислительных машинах (ЭВМ). В частности, с помощью моделирования находят необходимые емкости накопителей деталей. Необходимость решения этой задачи определяется следующим обстоятельством. Если емкость накопителя мала, линия будет простаивать часто, так как накопитель оказывается пустым, когда работоспособность предыдущей секции еще не восстановлена. Когда в линии имеется несколько накопителей деталей, возникает задача: определить емкость каждого из них, тем более, что вдоль линии емкости накопителей должны быть различными.

Математическая модель автоматической линии представляет собой моделирующий алгоритм, который записан на языке ЭВМ и имитирует взаимодействие секций и накопителей линии, причем учитывает случайность времени бесперебойной работы секций и времени устранения отказов секций и накопителей деталей. В работе [46] описывается модель работы автоматической линии, состоящей из  $n$  секций и  $n-1$  накопителей. Модель была реализована на ЭВМ «Минск-22». Входными данными явились число секций автоматической линии  $i$  ( $2 \leq i \leq n$ ); функции распределения времени бесперебойной работы секций и накопителей; функции распределения времени устранения отказов секций и накопителей; продолжительность циклов работы секций; максимальные емкости накопителей; соотношения между видами отказов секций — по вине оборудования и инструментов. Входную информацию для математического моделирования получают путем наблюдения линий, аналогичных моделируемой.

Случайные факторы, которые будут иметь место при работе моделируемой линии, имитируются случайными числами, вырабатываемыми ЭВМ в процессе моделирования. В результате моделирования получают кривые производительности линии в зависимости от емкости накопителей. По этим кривым можно выбрать оптимальные емкости накопителей. Моделирование линий дает надежные результаты достаточно быстро — за несколько минут работы ЭВМ [6].

### 3. 5. Некоторые технологические и организационные методы, способствующие повышению надежности станков

**Общие сведения.** Надежность, обоснованная и заложенная в проект в конструкторском бюро, должна быть обеспечена в процессе изготовления станочных деталей, сборки и отладки станка или линии. Встречаются случаи, когда технология не может дать нужного уровня надежности станков или автоматических линий и этим губит хорошие конструкции.

Недостаточный уровень надежности станков и автоматических линий, получаемый на стадии их изготовле-

ния, может быть следствием одной или нескольких следующих причин:

1) детали изготовлены из материалов, малопригодных для них, или из материалов, имеющих дефекты;

2) принятый технологический процесс изготовления деталей не может обеспечить требуемые от них эксплуатационные свойства;

3) принятый технологический процесс в принципе дает нужные эксплуатационные свойства деталей, но в ходе осуществления процесса допускаются его нарушения вследствие плохой организации производства, недостаточной квалификации работников и т. д.;

4) станок плохо собран и отрегулирован.

Качество металла иногда отклоняется от требований стандарта. В чугунных деталях бывают усадочные и газовые раковины, в стальных — расслоения, волосовины и другие дефекты. Базовые детали станков часто изготавливаются из чугунов низкого качества и имеют недостаточную твердость рабочих поверхностей. Проблема значительного повышения надежности металлорежущего оборудования может быть решена только при более широком применении модифицированных и легированных чугунов, хромоникелевых сталей, пластмасс, высокооловянистых бронз. Необходимо обрабатывать термически все нагруженные стальные детали, увеличить долю азотируемых и цементируемых деталей. Вообще, термическая и химико-термическая обработки исключительно важны для повышения долговечности деталей, следует искать новые области для их применения. Так, поверхностная закалка чугунных направляющих повышает их износостойкость в 2,5—3,5 раза, закалка колес до высокой твердости во много раз увеличивает их долговечность.

В настоящее время имеются технологические процессы, которые обеспечивают высокую долговечность всех деталей станков [14, 50]. Однако из-за отсутствия оборудования и оснастки некоторые из них применяются недостаточно широко. Например, сравнительно редко выполняют шлифование и хонингование зубьев шестерен, хонингование их отверстий, шлифование шлицев на валах, покрытие трущихся поверхностей износостойкими металлами и пластмассами, антифрикционные покрытия,

алмазное выглаживание, а также другие методы тонкого пластического деформирования.

Мы уже отмечали, что улучшение организации производства обязательно ведет к повышению качества выпускаемых предприятием изделий. Остановимся только на роли технологической дисциплины, автоматизированной системы управления производством и системы бездефектного изготовления продукции [39].

**Роль технологической дисциплины.** Осуществляемые технологические процессы должны полностью соответствовать технической документации. За этим следят работники технологической службы и отдела технического контроля.

С целью улучшения технологической дисциплины необходимо воспитывать уважение к техническим документам у рабочих и инженерно-технических работников, а также повышать их квалификацию. Чтобы не допускать ошибок в документах, их необходимо совершенствовать. Следует применять типовые чертежи втулок, сверл, фрез, скоб и других изделий, а также бескопирное размножение с помощью электрографических установок. Для предотвращения ошибок при проектировании технологической оснастки необходимо внедрять систему бездефектного проектирования.

**Роль автоматизированной системы управления производством.** В рамках этой системы с применением ЭВМ выполняются следующие работы.

По технической подготовке производства — расчеты приспособлений, мерительных инструментов, сложных режущих инструментов, режимов резания, технических норм времени. Возможность рассчитать на ЭВМ множество вариантов позволяет выбрать наиболее рациональный технологический процесс с учетом большого количества ограничений, в том числе по требуемому уровню качества изготавливаемых изделий.

По материально-техническому обеспечению производства — расчет потребности материалов.

По оперативно-производственному планированию — разработка сетевых графиков, учет ежедневного выпуска продукции, расчет суточной потребности деталей.

По бухгалтерскому учету — расчеты расхода зарплат, материалов, инструментов.

Своевременная информация о ходе производственного

процесса является исходным пунктом для управления производством, в том числе для организации ритмичного выпуска продукции.

**Организация бездефектного изготовления продукции и сдачи ее с первого предъявления.** При этой системе продукция (или техническая документация) сдается следующим образом. Перед сдачей каждый исполнитель тщательно проверяет ее качество. При обнаружении хотя бы одного дефекта контролер возвращает всю продукцию ее изготовителю для разбраковки и исправления дефектов.

Требование сдавать продукцию с первого предъявления приводит к необходимости содержать в порядке оборудование, оснастку и инструменты, внедрять прогрессивное оборудование и методы организации производства, перенимать передовой опыт.

Контролеры освобождаются от обязанности разбраковывать продукцию, их основной задачей становится анализ причин брака. В этом случае большое значение приобретают методы статистического контроля продукции. Отдел технического контроля должен располагать контрольными приборами, инструментами и методиками, которые соответствуют требуемому качеству контролируемой продукции.

### **3. 6. Группы надежности на станкостроительных заводах**

На многих станкостроительных заводах и в конструкторских бюро станкостроения созданы группы надежности. Эти группы выполняют две взаимосвязанные функции:

1) являются органами связи эксплуатационников с конструкторами и изготовителями станков;

2) являются организаторами работ по повышению надежности станков в ходе их проектирования и изготовления [19].

Группы надежности выполняют следующие работы: собирают и обобщают статистические сведения о поведении станков в эксплуатации с целью выявления их слабых мест и последующей разработки методов по устранению замеченных дефектов; изучают условия эксплуатации станков и разрабатывают рекомендации по рациональной эксплуатации; определяют номенклатуру и объ-

ем запасных частей; разрабатывают методики эксплуатационных наблюдений станков и методы экспериментального определения надежности, в том числе ускоренные; разрабатывают мероприятия, направленные на повышение надежности станков, и контролируют их выполнение.

Для того чтобы группа надежности смогла выполнять эти сложные функции, она должна состоять из высококвалифицированных специалистов.

## Глава 4. ПОДДЕРЖАНИЕ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

### 4.1. Типичные недостатки в эксплуатации станков

Станок может быть правильно спроектирован и хорошо изготовлен, однако в результате неправильной эксплуатации часто отказывает, подолгу простояет в ремонте и быстро изнашивается. Например, из-за недостатков конструкции и изготовления, дефектов ремонта, неправильной эксплуатации произошло соответственно 12, 11 и 77% аварий<sup>1</sup> и поломок<sup>1</sup> станков из двух тысяч проанализированных случаев.

Рассмотрим типичные недостатки эксплуатации станков, приводящие к недопустимым повреждениям их деталей.

1. Плохой уход за станком, нерегулярная смазка или применение плохой смазки (например, загрязненной в результате небрежного хранения), недостаточно тщательная очистка от стружки, пыли, остатков смазочно-охлаждающей жидкости. В результате интенсивное изнашивание деталей станка или образование на их поверхностях царапин, иногда превращающихся в задиры.

2. Использование станка не по назначению: универсальный — в качестве операционного, выполнение грубой обдирки на точном станке.

3. Неправильная наладка или регулировка станка: превышение допустимых усилий или крутящего момента, применение затупленных режущих инструментов, неправильная расстановка упоров.

4. Ошибки, допускаемые рабочим при управлении станком: переключение скоростей или подач на ходу

---

<sup>1</sup> *Авария* — это выход машины из строя, сопровождающийся нарушением производственного процесса или повреждением ответственных механизмов, узлов, деталей.

*Поломка* — это незначительное повреждение узлов или деталей без последующего нарушения производственного процесса [13].

станка, применение дополнительных рычагов для вращения маховичков и т. д.

5. Некачественный ремонт станка: замена вышедших из строя деталей деталями из материалов не той марки; отсутствие необходимого качества их. Надежность станков в значительной степени зависимости от ремонтников.

#### 4.2. Рекомендуемые методы эксплуатации станков

**Общие сведения.** Требования к условиям эксплуатации станков необходимо указывать в руководствах к ним. Учеными, инженерами и рабочими созданы рациональные методы эксплуатации станков, однако работа в этой области еще далеко не закончена. Рассмотрим общие требования к условиям и методам эксплуатации станков.

**Помещения для станков.** Станки классов Н и П устанавливаются в общих, а классов В, А, С — в изолированных помещениях. Работающие лезвийными инструментами станки классов Н и П желательно, а классов В, А и С обязательно устанавливать отдельно от станков, работающих абразивными инструментами.

Нормальная температура в помещениях  $20^{\circ}\text{C}$ . Допустимые колебания ее: для станков классов Н и П —  $\pm 3^{\circ}$ , В —  $\pm 1^{\circ}$ , А и С —  $\pm 0,5^{\circ}$ . В помещениях для станков классов А и С предусматривается кондиционирование воздуха.

Площадь, отводимая под станки, должна соответствовать установленным нормам. Тогда обеспечивается доступ ко всем узлам станков, возможность транспортирования станков для ремонта, возможность размещения стендов для заготовок и обработанных деталей, шкафчиков для инструментов.

**Работа на станках.** На станке может работать только обученный рабочий, имеющий соответствующее удостоверение, и выполняться работа, для которой он предназначен. Плохая организация рабочего места станочника не только снижает производительность труда, но и приводит к снижению долговечности станков. Отсутствие специального места для инструментов, стендов для заготовок или обработанных деталей вынуждает рабочих класть детали и инструменты на направляющие или столы станков. В результате на направляющих образуются забоины и царапины, станок быстро изнашивается.



Нельзя применять затупившийся инструмент, обрабатывать на точных станках детали, покрытые ржавчиной, окалиной, пригоревшей формовочной землей.

**Уход за станками. Защита от загрязнения.** Помещения, в которых находятся станки, и спецодежда рабочих должны быть чистыми, а салфетки, которыми протирают точные станки,—выстиранными.

Станочник обязан следить за исправностью устройств (щитков, лент, мехов и т. д.), предохраняющих ответственные элементы станка от загрязнений. В конце смены он очищает станок от стружки, пыли, смазочно-охлаждающей жидкости. После этого смазывает направляющие, винты, гильзы и другие наружные поверхности трения, а остальные обработанные поверхности протирает салфетками, смоченными в масле, и передает чистый станок сменщику.

Для защиты от пыли прецизионные станки или их ответственные узлы в нерабочее время должны быть накрыты чехлами, если перерыв в работе составляет более суток.

**Смазка станков.** Необходимо контролировать качество смазок при поступлении их на завод. Смазки должны тщательно предохранять от загрязнений. Их нужно хранить в закрытых баках, цвет бака должен соответствовать сорту находящейся в нем смазки. Например, в красном баке—индустриальное масло, в желтом—вазелиновое.

Станок смазывается в соответствии с картой смазки, которую желательно вывешивать у станка. На карте обозначены смазочные точки, сорт масла, периодичность смазки. Смазочные точки на карте смазки и на станке должны быть окрашены в цвет, соответствующий сорту масла.

Раздаточная тара должна раз в полгода очищаться от загрязнений. Очистка состоит из слива масла, пропарки, мойки, сушки на заводском складе масел.

**Периодическая промывка станков.** Смазка с течением времени портится—окисляется и загрязняется, поэтому ее необходимо периодически заменять, а смазываемые узлы промывать керосином. Замена смазки и промывка выполняются во время плановых ремонтов и осмотров.

Необходимо периодически промывать войлочные уп-

лотнения шпindelных гильз, фетровые стружкоочистители, направляющие, зубчатые и червячные передачи, не находящиеся внутри редукторов, пластинчатые и сетчатые масляные фильтры, колпачковые масленки для консистентной смазки.

При замене масла в системе централизованной смазки и в узлах с ручной смазкой необходимо очищать смазываемые узлы и промывать их керосином. Например, заменяя масло в системе централизованной смазки, промывают резервуары для масла, трубы и корпуса смазываемых узлов. Для этого выполняется следующая работа: сливается отработанное масло; резервуары очищаются от грязи и масла; их поверхности протираются салфетками без ворса; система смазки промывается керосином в течение 10—15 мин; керосин сливается; система смазки промывается свежим маслом в течение 10—15 мин, а затем заполняется свежим маслом.

Масло заливается в станки через сетчатые фильтры с ячейками размером до 0,25 мм. Для заливки каждого сорта масла должен быть свой трубопровод.

**Регулировка станков.** Регулировкой устраняют радиальное и осевое биения шпинделей, зазоры в винтовых парах, осевой люфт делительных червяков и т. д. Регулировка этих узлов выполняется по результатам проверки станка на геометрическую и кинематическую точность. Периодически регулируют также фрикционные муфты и тормозы, давление масла в гидросистеме, натяжение ремней и цепей.

Предохранительные устройства регулируются мастерами. Правильность расстановки упоров необходимо опробовать сразу же после наладки станка.

**Проверка станков на технологическую точность.** Периодически проверяются точные станки, выполняющие финишные операции. Нормы точности для этих станков устанавливаются заводскими технологами в зависимости от точности обрабатываемых деталей, а не по стандарту на станки данного типа. По результатам проверки в случае надобности выполняют ремонт или регулировку станка.

#### 4. 3. Система плано-предупредительного ремонта металлорежущего оборудования (система ППР)

**Общие сведения.** В системе ППР основное внимание уделено профилактике износа и отказов оборудования. Она позволяет правильно организовать эксплуатацию оборудования, улучшить качество ремонта и сократить затраты на ремонт. Эта система требует выполнения технического обслуживания и ремонтов, после того как станок или автоматическая линия отработали определенное, заранее заданное количество часов.

Рассмотрим основные принципы системы ППР [13].

**Межремонтное обслуживание.** Эта работа по техническому уходу за оборудованием выполняется во время перерывов в работе оборудования и включает промывку, смену и пополнение масел; проверку геометрической точности оборудования; регулировку винтовых пар, подшипников шпинделя, тормозов, клиньев; проверку действия упоров, ограничителей, систем смазки и охлаждения. Правила выполнения этих работ были рассмотрены в предыдущем параграфе.

**Ремонтные работы.** Система ППР предусматривает для технологического оборудования три вида ремонтов: малый, средний и капитальный.

При малом ремонте станок частично разбирается. Наиболее изношенные и загрязненные узлы разбираются на детали и промываются. Изношенные детали (их обычно мало) заменяются или восстанавливаются. Механизмы регулируются. Ремонтируются системы охлаждения и смазки. Около 70% выполняемых ремонтных операций приходится на чистку и мойку деталей, на проверку и регулировку узлов и систем.

При среднем ремонте станок также разбирается частично. Отдельные узлы подвергаются капитальному ремонту. Основные изношенные детали заменяются или восстанавливаются. Например, шлифуются шейки шпинделя, заменяются или пришабриваются подшипники, восстанавливается точность ходовых винтов; заменяются изношенные подшипники качения, червячные пары, зубчатые колеса, втулки, валики. Изношенные направляющие шабруются или шлифуются.

Отремонтированный станок обкатывается на холостом ходу, проверяется на точность и жесткость и должен

удовлетворять нормам точности и жесткости нового станка.

При капитальном ремонте станок и все его узлы разбираются полностью, а детали промываются. Изношенные детали и узлы заменяются. Все направляющие станины, столов, кареток шабруются или шлифуются. При капитальном ремонте, как и при среднем, около 80% выполняемых ремонтных операций приходится на замену и восстановление деталей. В результате выполнения капитального ремонта эксплуатационные характеристики станка должны быть полностью восстановлены. После ремонта станок проверяется на точность, жесткость, шум, нагрев. Производится обкатка на холостом ходу.

### Структура и продолжительность ремонтных циклов.

*Ремонтным циклом*  $T$  называют время эксплуатации станка до первого капитального ремонта или между двумя капитальными ремонтами<sup>1</sup>. Величина  $T$  определяется по формуле

$$T = A \beta_n \beta_m \beta_y \beta_m,$$

где  $A = 2400$  для станков с возрастом до 10 лет;  
 $\beta_n$  — коэффициент, учитывающий тип производства;  
 $\beta_m$  — коэффициент, учитывающий обрабатываемый материал и класс точности станка;  
 $\beta_y$  — коэффициент, учитывающий условия работы станка;  
 $\beta_m$  — коэффициент, учитывающий весовую категорию станка.

Как показывают эксплуатационные наблюдения, для средних и легких станков, работающих в индивидуальном, мелкосерийном и серийном производствах, ремонтный цикл составляет в среднем 85—90 мес, а для работающих в крупносерийном и массовом производствах — 75—80 мес.

<sup>1</sup> В этом параграфе основные определения даны в соответствии с [13]. По ГОСТу 16503—70 [9] календарная продолжительность от начала эксплуатации изделия до первого капитального ремонта называется *сроком службы до первого капитального ремонта*, календарная продолжительность эксплуатации изделия между двумя последовательными капитальными ремонтами называется *межремонтным сроком службы*.

Обозначим малый, средний и капитальный ремонты буквами *M*, *C* и *K* соответственно. Цифра при букве будет обозначать порядковый номер ремонта данного вида.

Система ППР устанавливает определенное чередование малых и средних ремонтов в ремонтном цикле, т. е. структуру ремонтного цикла. Например, для легких и средних станков весом до 10 т, выпущенных до 1967 г., независимо от типов и моделей станков установлена следующая структура ремонтного цикла:

$M_1—M_2—C_1—M_3—M_4—C_2—M_5—M_6—K$ ,

т. е. два средних и шесть малых ремонтов.

Для станков, выпускаемых с 1967 г., вводится структура  $M_1—M_2—C_1—M_3—M_4—K$ , т. е. один средний и четыре малых ремонта.

Период работы оборудования между двумя очередными плановыми ремонтами называется *межремонтным периодом*.

Система ППР рекомендует выполнять для станков общего назначения за весь срок их службы не более одного-двух капитальных ремонтов, если станки работают в две смены в серийном производстве.

Трудоемкость ремонта машины, зависящая от ее конструкции и ремонтпригодности, оценивается категориями сложности ремонта *R*. За эталон принят токарно-винторезный станок модели 1К62 с расстоянием между центрами 1000 мм, который относится к одиннадцатой категории сложности ремонта, т. е. для него  $R=11$ . Остальные станки сравниваются со станком модели 1К62.

#### 4.4. Техническая диагностика оборудования

Важными методами обеспечения эксплуатационной надежности станков являются оперативный контроль, профилактика неисправностей и техническая диагностика [43].

Примером оперативного контроля может служить контроль информации, вводимой в систему числового программного управления станком. Обычно это контроль по модулю или на четность. При наличии ошибок в кадре программы, в случае испорченной перфоленты или неисправностей в блоке считывания перфоленты

станок останавливается. Этим предотвращаются брак при обработке и поломка инструмента.

Профилактику неисправностей поясним также на примерах станков с системой ЧПУ. Для предупреждения возможных неисправностей при обработке деталей предусматривается работа станков по тест-программам во время профилактического обслуживания. Тесты позволяют установить, исправна или неисправна система ЧПУ.

В последние годы появились методы и средства, позволяющие оценить состояние деталей и узлов машины, а также находить отказы и неисправности без разборки машины. Совокупность таких методов и средств называется *технической диагностикой*.

Методы технической диагностики основаны на учете изменений вибрации машины, шумообразования, жесткости, мощности холостого хода, тепловыделения по мере исчерпания ресурса машины. Одним из хороших методов является метод поверхностной активации, который позволяет контролировать износ деталей в эксплуатационных условиях без разборки машины.

В связи с тем что условия работы различных однотипных станков различны, к моменту выхода в ремонт техническое состояние их не одинаково. В то же время система ППР не имеет надежных критериев для обоснования необходимости ремонта машины. В результате машины могут поступать в ремонт преждевременно.

Хорошо обоснованная система диагностики дает возможность направлять в ремонт только те машины, которые действительно нуждаются в ремонте. Осуществлять диагностику электрических и электрогидравлических систем управления помогают их функциональные циклограммы, которые ускоряют поиск отказов [11, 12].

Функциональная циклограмма представляет собой таблицу, которая описывает работу схемы на протяжении всего цикла станка. В циклограмме записаны состояние системы в каждом элементе цикла и порядок срабатывания аппарата при переходе от одного элемента цикла к другому.

Функциональные циклограммы можно составлять вручную или автоматически — с помощью ЭВМ. Рассмотрим составление функциональной циклограммы для простой гидросхемы, изображенной на рис. 4.1. Исход-

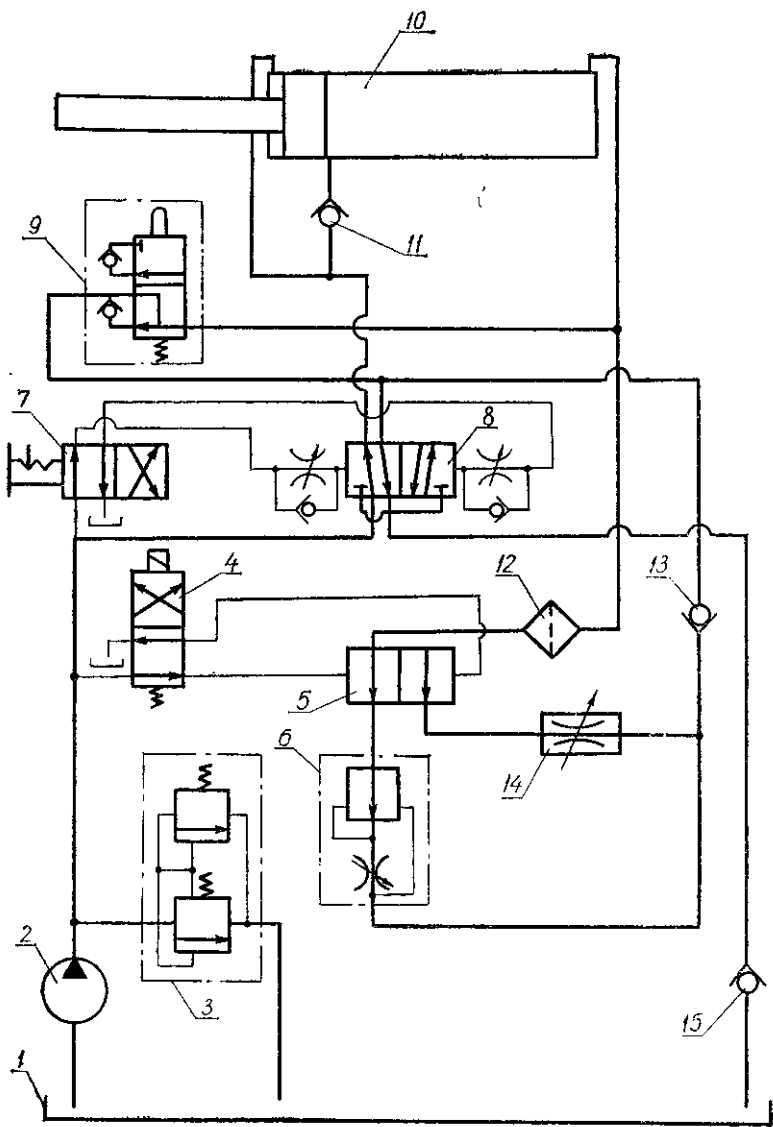


Рис. 4. 1. Гидравлическая схема привода подачи

ное положение поршня — крайнее левое. В это время плунжер золотника 8 смещен влево с помощью крана 7, переключенного вручную. Плунжер золотника 4 с помощью электромагнита перемещен вниз, в результате чего плунжер золотника 5 смещен влево. Масло от насоса 2 поступает в бесштоковую полость цилиндра 10 через золотник 8 и 9 и сливается из нее в бак 1 через золотники 8 и обратный клапан 15. В результате стол станка находится в крайнем левом положении.

Для быстрого перемещения стола вправо переключают вручную кран 7. При этом плунжер золотника 8 перемещается вправо. Масло от насоса подводится в штоковую полость цилиндра 10, а из бесштоковой полости сливается в бак через золотники 9, 8 и клапан 15. Стол быстро перемещается вправо. Быстрый подвод заканчивается, когда кулачок, установленный на столе, перемещает вниз плунжер золотника 9. Теперь масло не может выходить из бесштоковой полости цилиндра через золотник 9 и сливается из нее только через фильтр 12, дроссель 14, обратный клапан 13, золотник 8 и обратный клапан 15. Так как масло проходит через дроссель, стол совершает медленный подвод.

Стол переходит на рабочую подачу, когда с помощью упора через конечный переключатель выключается электромагнит золотника 4 и под действием пружины его плунжер перемещается вверх. В это время плунжер золотника 5 перемещается вправо, а масло из бесштоковой полости цилиндра 10 сливается в бак через регулятор скорости 6, определяющий величину рабочей подачи, и далее, как в предыдущем элементе цикла. Давление в цилиндре регулируется золотником 3.

Когда стол приходит в крайнее правое положение, он переключает кран управления 7, так что плунжер золотника 8 переходит в левое положение. В результате стол быстро перемещается влево, так как масло поступает в бесштоковую полость цилиндра 10 через обратный клапан золотника 9, а из штоковой полости свободно сливается в бак через обратный клапан 15. Стол останавливается, когда приходит в исходное положение, и бесштоковая полость цилиндра 10 соединяется с баком через обратный клапан 11.

Для составления функциональных циклограмм применяется следующая символика. Буквами Н, В, Л, П



обозначают соответственно нижнее и верхнее, левое и правое положения золотников. Скобками отмечают аппараты, которые переключались при переходе схемы из предыдущего состояния в данное. Цифровыми индексами отмечают последовательность срабатывания аппаратов при переходе системы в данное состояние. Посредством принятых символов все словесное описание гидросхемы, приведенное выше, заменяется табл. 4.1, которая и представляет собой функциональную циклограмму этой гидросистемы.

Табл. 4.1. Функциональная циклограмма гидросхемы

Элементы цикла станка	Номер состояния схемы	Аппараты управления				
		7	8	5	4	9
Исходное положение	I	Л	Л	Л	Н	В
Быстрый ход вперед	II	(П) <sub>1</sub>	(П) <sub>2</sub>	Л	Н	В
Медленный подвод	III	П	П	Л	Н	(Н) <sub>1</sub>
Рабочая подача	IV	П	П	(П) <sub>2</sub>	(В) <sub>1</sub>	Н
Быстрый ход назад	V	(Л) <sub>1</sub>	(Л) <sub>2</sub>	П	В	Н
	VI	Л	Л	(Л) <sub>2</sub>	(Н) <sub>1</sub>	Н
	VII	Л	Л	Л	Н	(В) <sub>1</sub>
Исходное положение		Л	Л	Л	Н	В

Например, вторая строка циклограммы показывает, что при переходе из исходного положения на быстрый подвод сначала перемещается вправо кран 7, затем переключается вправо золотник 8, а остальные аппараты остаются в прежних состояниях. Когда стол быстро перемещается назад, схема последовательно оказывается в трех состояниях из-за включения электромагнита золотника 4 при нажатии упора на конечный переключатель, а также в результате подъема плунжера золотника 9 при освобождении его от действия кулачка.

По функциональной циклограмме легко находится причина отказа гидросхемы. Например, предположим, что после медленного подвода стол не перешел на рабочую подачу, требуется найти причину отказа. Для отыскания неисправности проверяем состояние аппаратов в гидросхеме станка. Отказы следует искать в тех аппаратах, которые не находятся в состояниях, соответствующих четвертой строке функциональной циклограммы.

## Глава 5. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ГИДРО- И ЭЛЕКТРОСИСТЕМ

### 5.1. Сохранение эксплуатационных свойств рабочих жидкостей

**Общие сведения.** Гидравлическая система станка содержит следующие части: бак, источники давления (насосы, иногда аккумулятор давления), распределительную и регулирующую аппаратуру, потребители, трубопроводы и соединительную аппаратуру.

Наблюдаются следующие основные виды отказов гидросистем: повреждения трубопроводов и соединительной аппаратуры, заклинивание подвижных элементов гидроаппаратов, износ насосов и аппаратов, перегрев масла. Причинами их являются низкое качество масла и плохая его фильтрация, пульсация давления и гидравлические удары, нарушения внутренней и внешней герметичности, низкая долговечность гидравлических машин и аппаратов.

Эксплуатационные свойства рабочей жидкости характеризуются степенью загрязненности, способностью противостоять окислению и вспениванию, смазочными свойствами, зависимостью вязкости от температуры и давления и др.

**Сохранение чистоты масла.** Частицы загрязнений в рабочую жидкость попадают различными путями: вместе с пылью из воздуха еще до заливки масла в бак, а также через заливную горловину и уплотнения штоков силовых цилиндров; в виде частиц, появляющихся при износе элементов гидроагрегатов; притирочных паст и микропорошков с поверхностей деталей аппаратуры; в виде окалины, образующейся при сварке труб, и т. д.

Исследования показывают, что загрязненность жидкости доходит до 0,13% от ее веса, в то время как ГОСТ 6370—59 допускает 0,005%. Загрязнения состоят, в основном, из кварца, окислов металлов, компонентов притирочных паст. Твердость частиц обычно выше твердости деталей гидроагрегатов. Частицы имеют размеры от 0,002 до 0,2 мм.

Частицы загрязнений перемещаются вместе с жидкостью. В тех местах, где скорость жидкости резко уменьшается (например, во входах в агрегаты, в распределителях), они оседают. Частицы, соизмеримые с зазорами между деталями гидроагрегатов, попадают в эти зазоры. При перемещении между поверхностями деталей или внедрении в одну из них частицы образуют

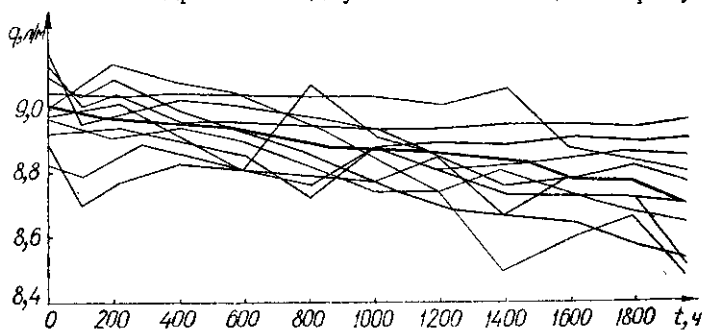


Рис. 5. 1. Изменение производительности  $q$  насосов типа Г11-22А в зависимости от отработанного ими времени

на поверхностях риски. В результате этого детали гидроагрегатов изнашиваются, и гидроагрегаты теряют свои первоначальные свойства: уменьшаются объемный к. п. д. и производительность насосов (рис. 5. 1), уве-

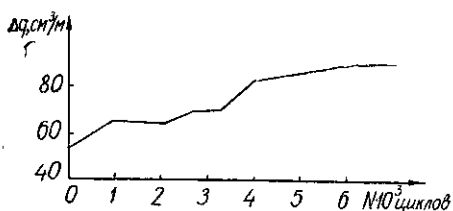


Рис. 5. 2. Изменение утечек масла  $\Delta q$  в цилиндре станка модели 3А130

личиваются утечки в цилиндрах (рис. 5. 2), нарушается герметичность обратных клапанов, реверсивных золотников и т. д. Представление о характере и величине износа деталей гидроагрегатов дает рис. 5. 3 [48].

В ряде случаев наблюдается чрезвычайно низкая долговечность узлов гидросистемы. Так, срок службы пластинчатых насосов Г12-1 и Г12-2 на станках, установленных в некоторых цехах Минского тракторного завода, 1000—2000 ч при сроке гарантии 5000 ч, а срок

службы резиновых уплотнений — от 15 до 90 дней. Как показали наблюдения, главная причина низкой долговечности этих элементов гидросистемы — недопустимая загрязненность масла механическими примесями. Час-

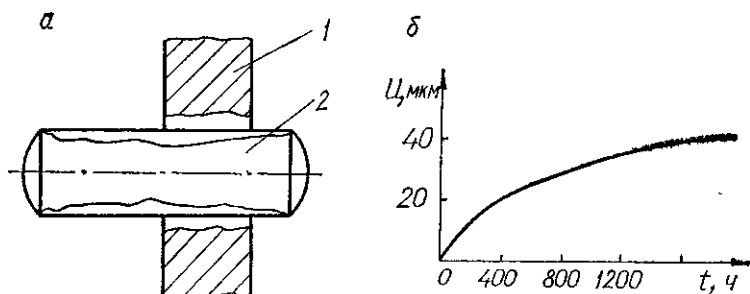


Рис. 5.3. Износ деталей гидромашин типа Г15-21: а — барабана 1 и толкателя 2; б — распределительного диска

тицы, попавшие в зазоры плунжерных пар, резко увеличивают усилия страгивания плунжеров и золотников с места и могут вызывать их заклинивание. По этой причине часто отказывают предохранительные клапаны и реверсивные золотники.

Необходимо строго следить за тем, чтобы грязь не попадала в гидросистему станка, и выполнять следующие требования.

1. После монтажа и обкатки гидросистему промывать жидкостью, которой сообщается скорость в 1,5—2 раза выше ее рабочей скорости.

2. Для удаления из трубопроводов грязи, ржавчины и окалины травить их раствором серной кислоты с последующей промывкой. Весьма эффективна ультразвуковая очистка труб. Когда это возможно, следует выполнять гибку труб в холодную, для того чтобы избежать образования в них окалины при нагреве.

3. Все звенья гидросистемы тщательно герметизировать, например масляные баки должны иметь крышки с уплотнениями и воздушные фильтры, а трубопроводы, соединенные с баками, также должны иметь уплотнения.

4. Внутренние поверхности баков хорошо очищать и окрашивать, так как иногда в них наблюдается вымывание литейной земли из-под краски.

5. Предусматривать возможность слива масла из баков и очистку их внутренних поверхностей.

6. Масло заливать в баки через сетчатые фильтры.

7. Строго регламентировать правила эксплуатации гидрофицированного металлорежущего оборудования.

Смена масла в гидросистемах станков может быть механизирована. На ряде заводов применяется специальная передвижная установка, которая позволяет заменять масло следующим образом. Сначала установка высасывает масло из бака станка, затем промывает гидросистему чистым маслом под давлением и, наконец, заливает в бак новое масло. Благодаря описанной последовательности смены масла оно оказывается в гидросистеме более чистым, чем при обычной, немеханизированной смене.

Наблюдения показывают, что удаление из масла половины механических примесей ведет к повышению долговечности элементов гидросистем в 2—3 раза.

**Предохранение масла от старения.** Рабочая жидкость не только передает энергию в гидросистеме, она смазывает поверхности гидроагрегатов и этим предохраняет их от сухого трения. Однако в результате воздействия различных факторов применяемые в гидросистемах станков минеральные масла через определенное время теряют смазочные и вязкостные свойства, стареют. При относительно высоких температурах, характерных для гидроприводов станков, масла окисляются. При этом образуются высокомолекулярные соединения, засоряющие узкие щели в аппаратах.

Если в масле имеется вода, образуются низкотемпературные осадки, водомасляная эмульсия и пена, поэтому необходимо предохранять масло от попадания воды. Очень вредна для масла сера. Она вызывает поверхностное затвердевание уплотнительных резиновых колец, вследствие чего они выходят из строя. Воздух в масле ухудшает его смазочные свойства и способствует коррозии гидроагрегатов.

В особых случаях следует применять масла повышенного качества, которые окисляются, омыливаются и вспениваются в меньшей степени, чем обычные минеральные масла. Масла повышенного качества (например, марки ВНИИ МП-403) хорошо очищены, содержат ряд присадок.

Необходимо разрабатывать и строго соблюдать графики смены масла после определенного срока его использования, пока масло не достигло недопустимой степени старения.

**Предохранение масла от чрезмерного нагревания.** Соблюдение температурного режима масла важно как для уменьшения скорости его старения, так и для поддержания его вязкости и соответственно скорости исполнительных механизмов станка постоянными, для уменьшения тепловых деформаций станка и старения резиновых уплотнений. Если не принимать специальных мер, в результате нагревания масла некоторые станки и автоматические линии становятся практически неработоспособными. Например, в некоторых станках с программным управлением летом температура масла достигает 60—70°C. Изменение температуры масла показано на рис. 5. 4.

Приведем основные методы снижения температуры масла.

1. Установка змеевиков с проточной холодной водой в гидробаках, что позволяет снижать температуру с 60—70 до 35—45°C. Змеевики используют, например, в станках с программным управлением.

2. Применение холодильных фреоновых агрегатов (например, на Харьковском заводе «Серп и молот» все гидростанции автоматических линий снабжены такими агрегатами).

3. Снижение рабочего давления масла (к сожалению, иногда давление необоснованно завышают).

4. Применение гидробака нужного объема, определенного из условия сохранения температуры масла ниже предельно допустимой.

5. Встраивание в гидросистему воздушного теплообменника (например, в горизонтально-протяжном станке модели 7Б56).

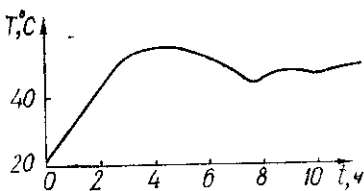


Рис. 5. 4. Изменение температуры масла  $T$  в баке гидростанции агрегатного станка

## 5. 2. Методы повышения безотказности и ремонтпригодности электросистем управления

Приборы, аппараты и электрические машины, входящие в электрическую систему управления, можно разделить на три группы [26].

Первую группу составляют механизмы и аппараты, преобразующие механические и другие физические воздействия в электрические команды. Сюда относятся кнопки управления, путевые выключатели, различные переключатели, датчики. Все это — командные органы.

Во вторую группу входят аппараты, служащие для передачи, распределения, усиления, инверсирования электрических командных импульсов, вырабатываемых аппаратами первой группы. Эта группа включает магнитные пускатели (контакторы), реле времени, промежуточные реле.

Третью группу составляют исполнительные механизмы: электродвигатели, электромагниты, магнитные плиты, электромагнитные муфты.

Рассмотрим некоторые методы обеспечения надежной работы электрических машин и аппаратов. Аппараты первой группы размещаются на рабочих механизмах станка в соответствии с технологическим процессом, требованиями удобства обслуживания оборудования и правилами техники безопасности. Эти аппараты защищаются от масла, эмульсии, стружки, грязи, механических воздействий. Особое внимание уделяется путевым выключателям, которые обеспечивают необходимую последовательность движений. Их необходимо хорошо защищать от охлаждающей жидкости (ограждениями стационарного типа, выносом из зоны, куда попадает охлаждающая жидкость). Практически безотказно работают бесконтактные путевые переключатели.

Аппараты второй группы устанавливаются в нишах станин или в специальных шкафах и обычно хорошо защищены от повреждений. Благоприятно сказывается герметизация шкафов электрооборудования. У конструктора-электрика имеются большие возможности для создания надежных систем управления станками путем правильного выбора аппаратов второй группы, схем их соединений и применения пониженного напряжения в цепях управления. Теперь часто в цепях управления

применяют постоянный ток напряжением 24В. Система автоматического управления получается более компактной и надежной, чем система на основе сильноточной релейно-контактной аппаратуры.

Вот основные принципы, которыми должен руководствоваться конструктор [26, 45]:

а) уменьшение числа аппаратов в схеме при помощи научных методов синтеза систем, нормализации и унификации схем;

б) применение слаботочных реле автоматики (кодовых, телефонных, телеграфных), имеющих высокую надежность;

в) использование элементов радиоэлектроники (полупроводниковых диодов и триодов, сопротивлений, конденсаторов) в цепях постоянного тока низкого напряжения;

г) применение резервирования.

Известно, что около 30% отказов электросхем управления автоматическими линиями приходится на провода, которые соединяют аппараты, приборы и машины в единую электрическую схему. Общая длина соединительных проводов достигает 20—30 км. Иногда происходят обрывы соединительных проводов и короткие замыкания в них. Для повышения надежности электропроводки ее необходимо защищать от действия масла, эмульсии, стружки, грязи. Особенно следует заботиться о внешней разводке, соединяющей шкафы, пульта управления, агрегаты. Система верхнего монтажа электрической разводки автоматических линий (провода прокладываются в коробах, расположенных над линией) защищает провода от повреждений. Еще недавно применялась ненадежная нижняя разводка (провода прокладывались в стальных трубах в каналах, сделанных в полу цеха). Хорошие результаты дает защита металлорукавов полихлорвиниловой пленкой.

На восстановление работоспособности электрической системы сложного станка или автоматической линии требуется много времени, а особенно—на поиск неисправностей.

Рассмотрим основные пути улучшения ремонтпригодности электросхем.

1. Оснащение автоматических линий и сложных автоматических станков сигнальными устройствами, об-



легчающими поиск отказов в самих электросхемах. К таким устройствам относятся искатели повреждений, шаговые искатели и т. п. Для примера рассмотрим схему, сигнализирующую об отказах контактора  $K$  (рис. 5.5). При подаче напряжения должны сработать контактор  $K$  и реле сигнализации  $PC$ . Если контактор не включился (например, вследствие обрыва его катушки), загорается лампочка  $ЛСО$ , сигнализирующая об этом.

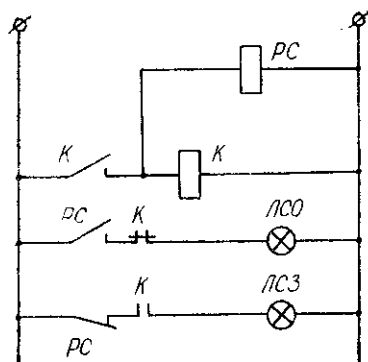


Рис. 5.5. Схема, сигнализирующая появление отказа контактора  $K$ .

Допустим, что контактор включился, но при снятии напряжения не выключился, тогда загорается лампочка  $ЛСЗ$ , сигнализирующая о залипании якоря контактора.

2. Применение принципа агрегатирования. Су-

щность его заключается в том, что для управления каждым механизмом создается своя схема как единое целое. Схемы отдельных механизмов связываются друг с другом.

3. Маркирование электропроводов, путевых переключателей и других аппаратов в соответствии с электросхемой.

## Глава 6. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

### 6.1. Испытания на надежность

*Испытаниями на надежность* называются такие испытания изделий, в результате которых получают оценки показателей их надежности:  $y_1, y_2, \dots, y_l$  (рис. 6.1).

Символами  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$  обозначены воздействующие на объект факторы: нагрузка, частота ее приложения или частота рабочего цикла, характеристики рабочей среды (температура, granulометрический состав загрязнений) и др. Факторы являются детерминированными или случайными функциями времени  $t$ . Исследователь

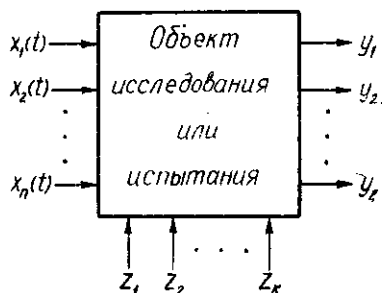


Рис. 6.1. Принцип испытаний на надежность

имеет возможность контролировать факторы, т. е. устанавливать их на определенных уровнях.

На испытываемый объект действуют также возмущающие неконтролируемые факторы  $z_1, z_2, \dots, z_k$ , которые увеличивают рассеивание результатов испытаний. Набор значений контролируемых факторов называется *режимом испытаний*:  $X \{ x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t) \}$ .

Если каждая из составляющих  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$  режима испытаний  $X$  находится в интервале, допустимом для изделия технической документацией, режим называется *нормальным*. Для уменьшения времени испытаний один или несколько факторов устанавливают на более тяжелых для изделия уровнях по сравнению с нормальным режимом. В результате элементы изделия разрушаются быстрее, чем при работе в нормальном режиме. Этот более тяжелый режим называется *ужесточенным*.

Объектами испытаний на надежность бывают сопряжения и кинематические пары, детали и отдельные узлы станка, станочные системы, т. е. автоматические линии. Нельзя ограничиться испытаниями объектов какого-либо одного типа. Так, испытание узла дает такие сведения о его надежности, которые не могут быть получены испытаниями отдельных входящих в него деталей. Это объясняется тем, что надежность узла обуславливается не только качеством изготовления его деталей, но также их взаимодействием, которое определяется конструктивными особенностями узла, качеством его сборки и регулировки, свойствами смазки и другими факторами. Испытания станочной системы — автоматической линии — позволяют получить оценки показателей надежности, учитывающие взаимодействия станков друг с другом и с остальными частями линии: транспортерами, накопителями деталей, перегружателями и т. д.

Испытания на надежность проводятся как в лабораторных условиях, так и в эксплуатации. Благодаря жесточению режима испытания в лабораторных условиях можно выполнить быстрее, чем в условиях эксплуатации. Зато испытания при эксплуатации дают более достоверные результаты, так как режим лабораторных испытаний может отражать условия эксплуатации только приближенно.

В зависимости от поставленной цели испытания на надежность делят на определительные, сравнительные и контрольные. *Определительными* называют такие испытания, в которых находят фактические значения показателей надежности изделий.

*Сравнительными испытаниями* определяют показатели надежности для партий изделий, отличающихся друг от друга конструкцией или технологией изготовления. Испытания всех объектов проводятся при одинаковых режимах, что делает возможным сравнение испытанных объектов по показателям надежности. Сравнительные испытания обычно проводятся для того, чтобы выбрать оптимальный конструктивный вариант изделия или наилучшую технологию его изготовления.

*Контрольными испытаниями* определяют, соответствует ли надежность изделия требованиям, установленным технической документацией. Контрольные испытания не позволяют находить фактических значений пока-

зателей надежности. Они с определенной доверительной вероятностью устанавливают, что показатели надежности изделий не ниже заданных значений.

В зависимости от числа одновременно варьируемых факторов испытания делят на однофакторные и многофакторные. *Однофакторными* называют испытания, которые проводятся при последовательном варьировании всех изучаемых факторов по одному. *Многофакторные* испытания выполняются при одновременном варьировании нескольких факторов, осуществляемом по определенным правилам. Во многих случаях эти испытания дают более полные сведения о надежности и выполняются быстрее по сравнению с однофакторными.

## 6.2. Испытания на износостойкость

**Общие сведения.** Как мы уже отмечали, большинство деталей и узлов станков теряют работоспособность вследствие износа. Поэтому измерение износа, анализ его причин и изменения во времени занимают важное место в работах по изучению надежности станков и автоматических линий. Испытания на износостойкость проводятся по описанной в предыдущем параграфе схеме. Так же изучают другие показатели, используемые в инженерной практике: коррозионную стойкость, усталость и др.

Хотя надежность изделия зависит от прочности его деталей, износостойкости и коррозионной стойкости их поверхностей, испытания на надежность не могут быть заменены испытаниями на прочность, износостойкость и т. д. Это объясняется тем, что между показателями надежности и износостойкости, прочности и другими часто не существует или не установлена вполне определенная связь. При наличии такой связи испытания элементов изделия на износостойкость, прочность, усталость и на другие показатели являются частью программы изучения надежности изделий.

Что касается металлорежущего оборудования, то его надежность в значительной степени определяется износостойкостью ответственных сопряжений и передач: направляющих, винтовых пар, шпиндельных подшипников, зубчатых передач, делительных червячных пар и т. д. Поэтому испытания на износостойкость подобных сопря-

жений и передач вполне обоснованно могут быть отнесены к исследованиям надежности. Основными показателями износа являются линейный износ, скорость изнашивания и интенсивность изнашивания. Чаще всего определяют линейный износ  $U$ , т. е. уменьшение размера детали вследствие износа в направлении, перпендикулярном к трущейся поверхности.

Иногда линейный износ измеряется не по нормали к трущейся поверхности, а определяется как изменение основных параметров детали. Например, на ходовых винтах измеряют износ по шагу, т. е. изменение шага в результате износа винта; иногда определяют износ по среднему диаметру винта.

Скорость изнашивания  $\gamma$  характеризует изменение износа во времени:

$$\gamma = \frac{dU}{dt}.$$

Интенсивность изнашивания  $I$  характеризует изменение износа с ростом пути трения  $S$ :

$$I = \frac{dU}{dS}.$$

Часто находят среднюю скорость изнашивания и среднюю интенсивность изнашивания за время  $\Delta t$  или на пути трения  $\Delta S$ :

$$\bar{\gamma} = \frac{\Delta U}{\Delta t};$$

$$\bar{I} = \frac{\Delta U}{\Delta S}.$$

Рассмотрим основные методы измерения износа.

**Метод микрометрирования.** Заключается он в том, что деталь измеряется до и после работы. Измерение производят микрометрами, индикаторами, миниметрами, с помощью прецизионных уровней. Измерительные приборы могут быть встроены в специальные приспособления. При измерениях иногда получаются значительные погрешности из-за непостоянства температуры, имеющих деформаций и погрешностей формы деталей.

Лучше измерять расстояние от постоянной базы до

изнашивающейся поверхности. За постоянную базу принимают неизношенные участки детали, если такие имеются. На направляющих станков специально предусматриваются не изнашивающиеся полоски (рис. 6.2). Неизношенные полоски могут также получаться в результате касания направляющих станины и подвижного узла не по всей ширине. Приняв за базу такую полоску, можно измерить износ направляющей уступомером (рис. 6.3).

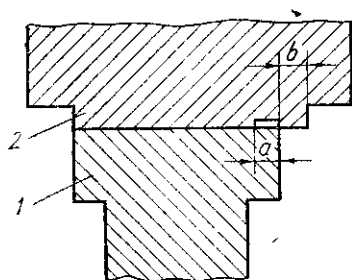


Рис. 6.2. Схема, поясняющая появление неизношенных полосок  $a$  и  $b$  на направляющих станины 1 и стола 2

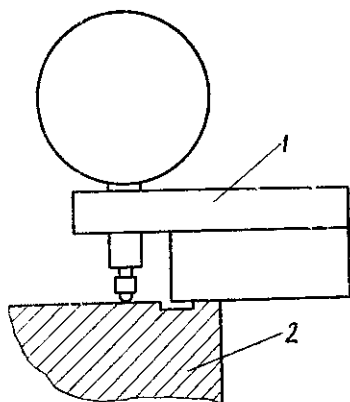


Рис. 6.3. Измерение износа направляющих уступомером: 1 — уступомер; 2 — станина

**Метод искусственных баз.** Сущность этого метода заключается в следующем. На поверхности трения делают углубление правильной формы. При износе детали уменьшаются размеры фигуры на ее трущейся поверхности, что дает возможность вычислить величину износа. Базой измерения является поверхность трения (искусственная база, откуда идет название метода — метод искусственных баз).

Для определения износа направляющих станков часто применяют один из методов искусственных баз — метод вырезанных лунок. Лунка на поверхности трения вырезается алмазным вращающимся резцом, имеющим

форму трехгранной пирамиды (рис. 6.4). Ее глубина вычисляется по формуле

$$h = \frac{l_0^2}{8r}.$$

Обычно  $l_0 = 1,7-2$  мм,  $h = 0,05-0,075$  мм. По уменьшению длины лунки в результате износа поверхности вычисляют линейный износ:

$$U = h_0 - h_1 = \frac{l_0^2 - l_1^2}{8r}.$$

Большие оси лунок располагают перпендикулярно к направлению перемещения подвижного узла. Для определения эпюры износа лунки вырезают в различных местах исследуемой поверхности.

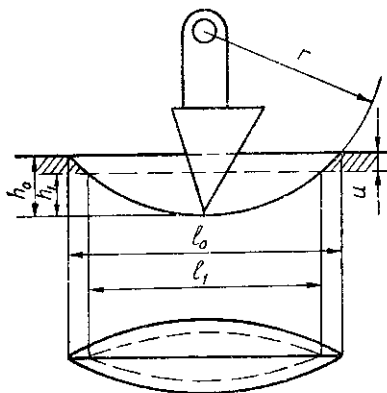


Рис. 6.4. Измерение износа по методу вырезанных лунок

Длины лунок измеряют через несколько месяцев работы станка. Погрешность измерения износа рассматриваемым методом составляет  $0,005-0,002$  мм [47].

Имеется специальный прибор «ИМАШ-Калибр» (модель 954) для вырезания лунок и измерения износа. Прибор крепится к исследуемой поверхности постоянными магнитами. В приборе имеется микроскоп для

наблюдения за процессом вырезания лунки и измерения ее длины. Метод вырезанных лунок рекомендуется применять для измерения износа до  $0,1$  мм, когда поверхность детали имеет шероховатость  $\nabla 8-\nabla 12$ . Наиболее целесообразные области применения метода: изучение износа деталей, когда для этого не требуется разбирать сопряжение, построение эпюр износа.

**Весовой метод.** Величина износа определяется взвешиванием хорошо очищенных образцов или деталей до и после испытаний или работы. Точность метода зависит от массы изучаемых образцов или деталей, а также от

точности весов. Метод рекомендуется для определения износа лабораторных образцов и деталей, имеющих массу до 200 г, например вкладышей подшипников скольжения, зубчатых колес, дисков фрикционных муфт [41].

**Метод профилографирования.** Износ измеряется с помощью записей микропрофиля (шероховатости) или макропрофиля (волнистости) изнашивающейся поверхности. Износ определяется по изменению расстояний от вершин выступов до дна впадин на последовательных профилограммах (рис. 6.5) [31].

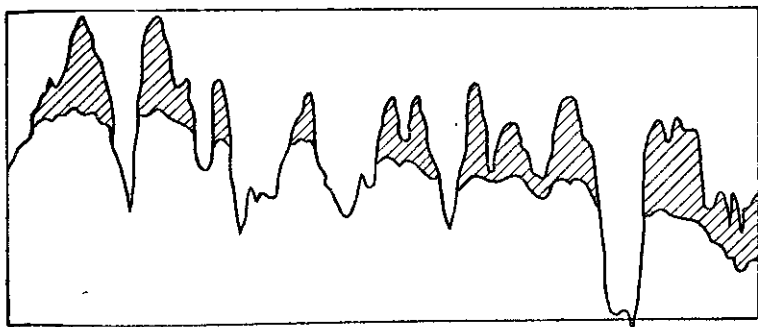


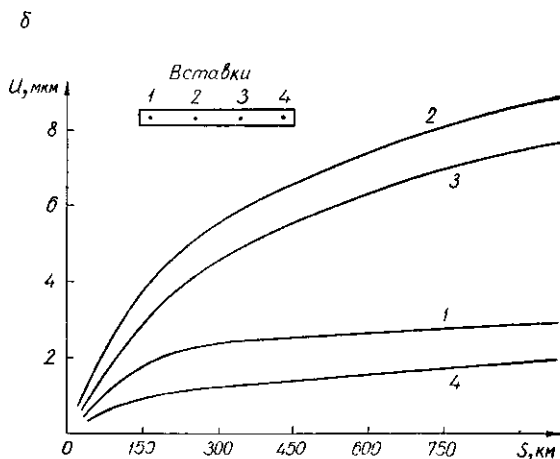
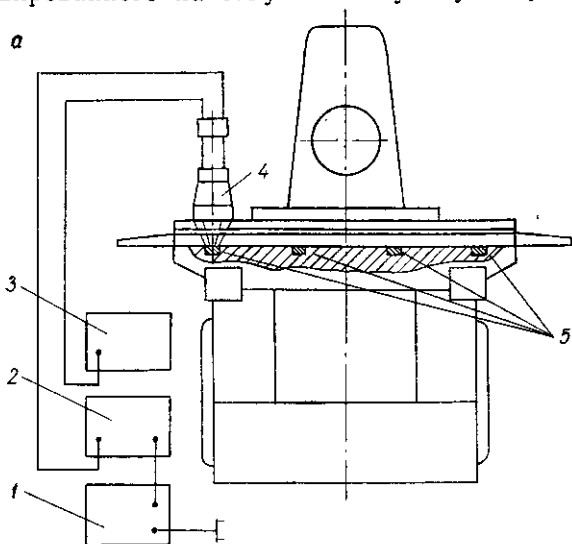
Рис. 6.5. Измерение износа по методу профилографирования

**Метод поверхностной активации** [37]. Изучаемый участок поверхности трения облучается в циклотроне потоком ускоренных заряженных частиц. Если деталь имеет большие габариты, активируются специальные вставки из материала детали, которые затем закрепляются в детали. Глубина активированного слоя должна быть приблизительно равной ожидаемому линейному износу (0,02—0,4 мм). Чтобы проводить испытания в обычных лабораторных или производственных условиях без специальной защиты от радиации, активность детали перед испытаниями должна быть менее 10 мккюри.

По мере изнашивания поверхностного слоя детали и удаления продуктов износа активированный слой становится тоньше и интенсивность радиоактивного излучения уменьшается. Радиоактивное излучение регистрируется стандартной радиометрической аппаратурой. Линейная величина износа определяется по тарировочной кри-



вой, которую строят путем истирания образца, изготовленного из того же материала, что и исследуемая деталь, и активированного на такую же глубину. При этом с



**Рис. 6.6.** Измерение износа направляющей плоскошлифовального станка модели ЗГ71М по методу поверхностной активации:

**а** — схема измерения износа; **б** — изменение износа направляющей в зависимости от пути  $S$ , пройденного столом (кривые 1—4 соответствуют вставкам 1—4)

помощью эталонов учитывают радиоактивный распад изотопов.

С применением метода поверхностной активации изучалось [28] изменение формы чугунных направляющих плоскошлифовального станка модели ЗГ71М (рис. 6.6). Вдоль плоской направляющей были установлены четыре радиоактивные вставки 5 диаметром 8 мм. Радиоактивное излучение воспринималось сцинтилляционным датчиком 4, установленным на столе станка. Датчик подводился к каждой из вставок, а станок в это время не работал. Датчик получал питание от выпрямителя 2, который был включен в сеть через стабилизатор напряжения 1. Электрические импульсы, вырабатываемые датчиком, подсчитывались прибором 3.

Высокая чувствительность радиометрической аппаратуры позволяет измерять износ величиной в 0,0005—0,002 мм с погрешностью 3—10%. Высокая точность этого метода делает возможным изучение износа прецизионных станков, которые теряют точность при сравнительно малых величинах износа деталей, равных нескольким тысячным долям миллиметра.

Метод поверхностной активации позволяет провести исследования, которые не могут быть выполнены другими путями. Сюда относятся. 1) определение изменения износа во времени, в процессе работы узлов, без их разборки, что позволяет изучать приработку деталей прецизионных станков; 2) определение износа деталей с рабочими поверхностями сложной геометрической формы (подшипники качения, винтовые и червячные пары).

Метод поверхностной активации невозможно применить, когда отделившиеся в результате износа частицы металла остаются в зоне сцинтилляционного датчика.

Применение метода поверхностной активации экономически нецелесообразно, когда поставленную задачу можно решить с использованием других методов измерения износа.

### 6.3. Эксплуатационные наблюдения

Испытания на надежность невозможны без предварительных наблюдений над работающими в эксплуатации изделиями, так как только эксплуатационные наблюдения дают информацию об условиях эксплуатации и о

поведении изделия в этих условиях. Эта информация необходима для определения режима испытаний на надежность.

Наблюдая за работой изделий в эксплуатации, исследователь обычно не оказывает влияния на входы объекта, не может создать желаемого режима его работы, а только фиксирует случайные уровни факторов и поведение объекта. Результаты эксплуатационных наблюдений выражают в виде гистограмм. Например, наблюдениями получили распределения размеров обрабатываемых на станках заготовок, распределения режимов обработки, мощности резания, крутящих моментов на валах и т. д.

Основываясь на результатах эксплуатационных наблюдений, исследователь разрабатывает программу лабораторных и эксплуатационных испытаний изделия: составляет наиболее вероятную схему потери работоспособности изделием; устанавливает пределы изменяемых факторов и уровни факторов, которые будут при испытаниях поддерживаться постоянными; составляет схему действующих сил; определяет признаки отказов и продолжительность испытаний; задает количество испытываемых объектов.

Эксплуатационную информацию используют не только в качестве исходной для разработки методов испытаний на надежность. Она также восполняет неизбежные потери сведений о действительной надежности изделий, возникающие вследствие неточного воспроизведения эксплуатационных условий при создании режима испытаний; вследствие ускорения испытаний, достигаемого ужесточением режима, а также в результате относительно небольшого числа испытываемых объектов.

Эксплуатационные наблюдения станков выполняются в виде наблюдений за опытной партией, кратковременных периодических обследований станков, длительных эксплуатационных исследований выборки станков.

Эксплуатационные наблюдения за опытной партией позволяют выявить дефекты конструкции и изготовления станка и устранить их при переходе к серийному производству. Некоторые дефекты обнаружить не удается. Это объясняется тем, что длительность таких наблюдений всегда меньше срока нормальной эксплуатации станка, иногда в несколько раз.

Технология, по которой изготавливаются образцы станков, должна максимально приближаться к технологии серийного производства.

Кратковременные обследования станков выполняются специалистами завода-изготовителя. Их продолжительность обычно равна одному месяцу. Обследования заключаются в наблюдении работы станков, анализе документации ремонтных служб, сборе замечаний и предложений обслуживающего персонала. В результате кратковременных обследований получают сведения о работоспособности узлов станка, об условиях его эксплуатации, о выполненных ремонтах.

Перед началом проектирования специального станка или автоматической линии необходимо выполнять обследования станков и линий, обрабатывающих аналогичные детали.

Рассмотрим основные положения методики длительных эксплуатационных исследований выборки станков [18]. Рекомендуется исследовать станки, выпуск которых хорошо освоен, которые работают на крупных заводах в типичных условиях.

Исследования проводятся специалистами группы надежности станкостроительного завода или СКБ путем периодических наблюдений (через каждые 3—4 месяца). В периоды между ними отказы и простои станков фиксируются рабочими-станочниками и работниками отдела главного механика завода-потребителя, так что исследования непрерывны.

Все сведения, получаемые в ходе эксплуатационных исследований, заносятся в специально разработанные формы. В журнале эксплуатационных наблюдений записываются данные об условиях работы станка (вид и характер обработки, обрабатываемые материалы и т. п.), замечания и предложения рабочих и инженеров о необходимости совершенствования конструкции станка, сведения о ранее проведенных ремонтах и др. Ведомости учета неисправностей и отказов станка, а также простоев в ремонте и по организационным причинам заполняются рабочими-станочниками. Рабочий указывает предполагаемую причину отказа, содержание и продолжительность ремонта. Перед началом эксплуатационных исследований обслуживающий персонал должен

быть ознакомлен с возможными видами и причинами отказов.

Специалисты группы надежности с помощью приборов записывают простои станков. В ряде случаев измеряют их жесткость, вибрацию, уровень шума. Определяют точность обработки, величину износа наиболее ответственных станочных деталей и влияние износа на точность станка. Благодаря периодичности измерений всех этих параметров имеется возможность оценивать процесс утраты станком первоначального качества.

В результате этих исследований определяют сроки службы деталей, трудоемкость ремонтов, показатели надежности станков и т. д. Хотя получаемые результаты характеризуют старые станки, эксплуатируемые несколько лет, но они позволяют найти наилучшие пути для создания новых высококачественных моделей.

Источниками информации об эксплуатационной надежности станков являются также опросные листы. Конструкторы и изготовители ставят в листах конкретные вопросы потребителям об условиях эксплуатации, о причинах и видах отказов, о проведенных ремонтах и др. По ответам потребителей устанавливают «слабые места» станков, в целях выяснения причин отказов принимают решения о необходимости стендовых испытаний тех или иных узлов, совершенствуют конструкцию станка и технологию его изготовления. Для того чтобы можно было обобщить информацию, содержащуюся в опросных листах, необходимо ставить достаточное количество вопросов об условиях эксплуатации станков.

#### 6. 4. Стендовые испытания

**Стенды.** Стендами называют оборудование, предназначенное для испытания машин, аппаратов, приборов и их элементов. На стендах испытывают на надежность или износостойкость образцы материалов, сопряжения и кинематические пары, детали, узлы и системы металло-режущих станков. Испытания на стендах называют *стендовыми*. Созданы стенды для испытаний на надежность гидравлических насосов, гидроцилиндров, трубопроводов, зубчатых передач, масляных фильтров, фрикционных муфт, вилок переключения шестерен, силовых столов агрегатных станков и многих других объектов.

Рассмотрим стенд (рис. 6.7) для испытаний на долговечность аксиально-поршневых гидромашин [2]. Этот пример дает некоторое представление о стендах вооб-

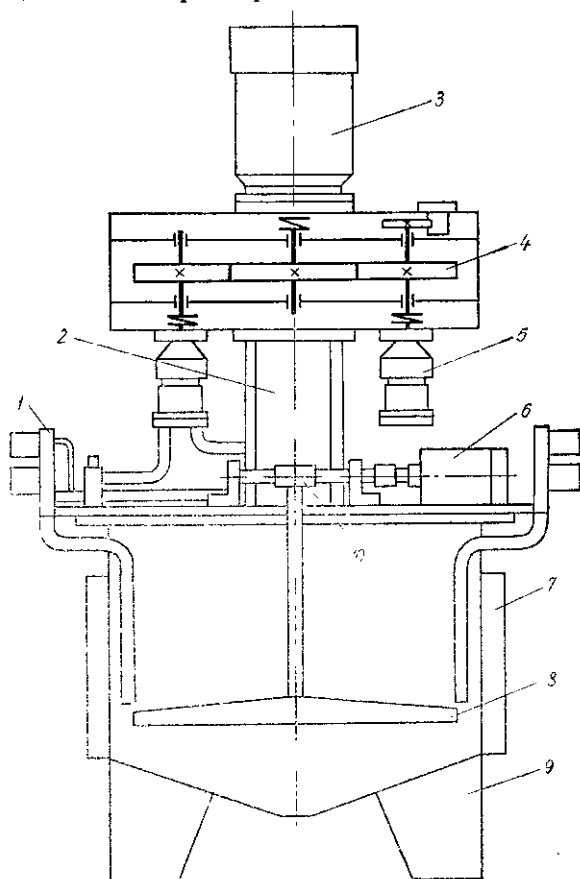


Рис. 6.7. Стенд для испытаний на долговечность аксиально-поршневых гидромашин

ще. В гидробак 9 заливается до 300 л масла. Вода, пропускаемая через гидравлическую рубашку 7, охлаждает масло до требуемой температуры. Для ускорения изнашивания гидромашин и сокращения времени испытаний в масло можно добавлять абразив. Поэтому в стенде имеется вибрационное устройство для приготовления

абразивной смеси и периодического введения ее в гидробак, а также мешалка 8—устройство для перемешивания масла в баке. Мешалка получает вращение от электродвигателя 6 через привод 10. Все испытываемые машины 5 (до восьми штук одновременно) получают вращение от электродвигателя постоянного тока 3 через редуктор 4, смонтированный на колонне 2. Управление стендом осуществляется с помощью пульта 1.

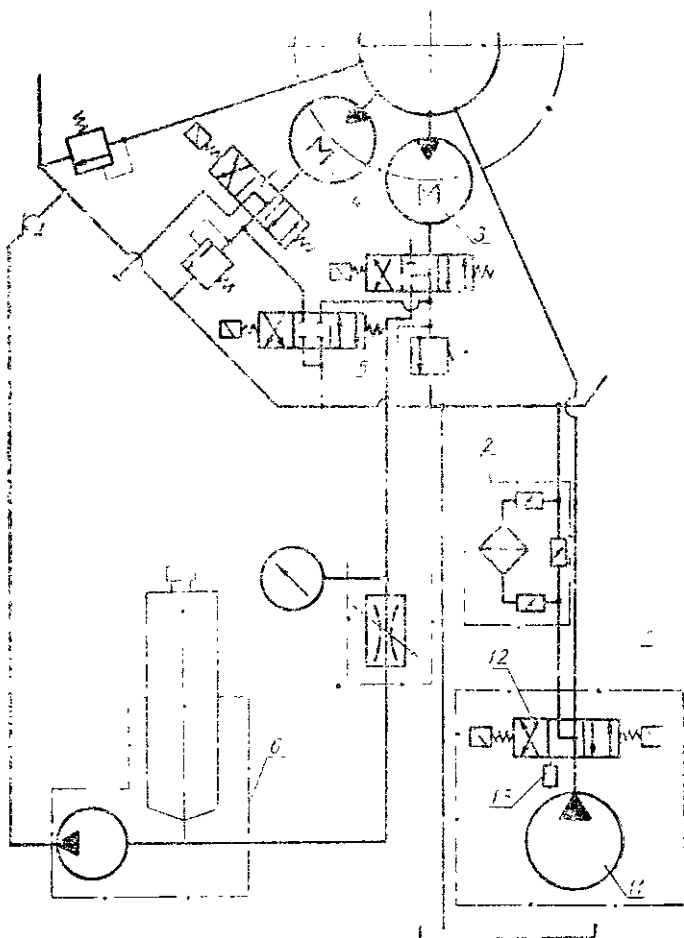


Рис. 6. 8. Гидросхема стенда для испытаний аксиально-поршневых гидромашин

родвигателя 6 через привод 10. Все испытываемые машины 5 (до восьми штук одновременно) получают вращение от электродвигателя постоянного тока 3 через редуктор 4, смонтированный на колонне 2. Управление стендом осуществляется с помощью пульта 1.

Для подпитки испытываемых машин 3, 4 в гидросхеме стенда (рис. 6.8) имеется установка 1, состоящая из электродвигателя, лопастного насоса 1.1, реверсивного золотника 1.2, напорного золотника (на рис. 6.8 не показан) и устройства для подогрева масла 1.3. Масло нуждается в подогреве до нормальной рабочей температуры после длительного перерыва в работе стенда. Температура масла контролируется и поддерживается в диапазоне  $50 \pm 1^\circ\text{C}$  с помощью ЭПП-09, датчик которого установлен в магистрале, подающей масло в линию подпитки. Когда температура масла приближается к верхней границе названного диапазона, установка для охлаждения начинает подавать воду в рубашку гидробака.

В процессе испытаний масло засоряется продуктами износа элементов испытываемых машин и гидроагрегатов самого стенда, а добавленный в масло абразив измельчается. Возникает необходимость в фильтрации масла. Установка для фильтрации 2 состоит из ряда фильтров и задерживает частицы с размерами, превышающими 12—16 мкм.

В эксплуатационных условиях режим работы гидромашин не остается постоянным, и это оказывает определенное влияние на долговечность гидромашин. Чтобы условия испытания приближались к эксплуатационным, давление масла в линии подпитки изменяется по программе, изображенной на рис. 6.9. Падение давления обеспечивается золотником 5 (рис. 6.8) с управлением от электромагнита.

В процессе испытаний определяют изменение во времени объемных характеристик каждой установленной на стенде гидромашин. Для этого служат электроконтактный секундомер и передвижной мерный бак 6.

Следует отметить, что большинство стендов построены по принципам, положенным в основу проектирования описанного стенда. Прежде всего каждый стенд имеет привод (часто регулируемый) испытываемого объекта

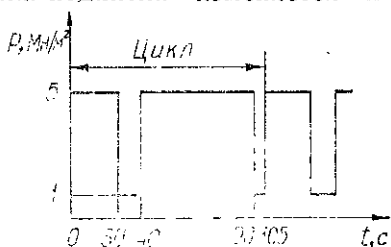


Рис. 6.9. График изменения давления масла при испытании аксиально-поршневых гидромашин



(объектов). Стенды стараются делать многоместными. В каждом стенде имеется нагрузочное устройство, а также устройства, создающие условия испытаний, близкие к эксплуатационным. Например, в стендах, предназначенных для испытаний на износ, специальные устройства обеспечивают необходимую весовую концентрацию абразивных частиц в смазке и ее температуру, а также удельный расход смазки, подаваемой на поверхность трения.

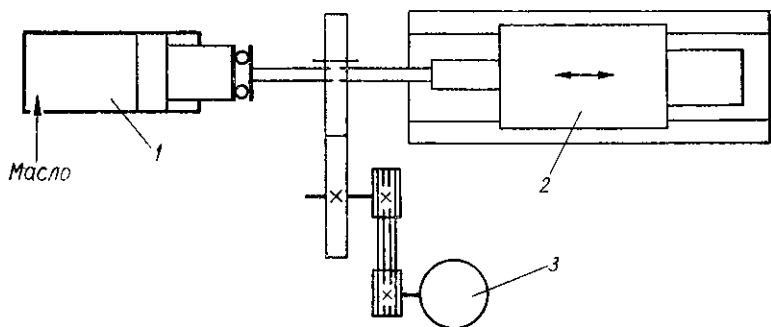


Рис. 6. 10. Схема стенда для испытаний силовых головок на долговечность

Чтобы условия испытаний на стендах были наиболее близкими к эксплуатационным, в стендах предусматривают устройства, которые случайно или по закону, полученному в эксплуатационных наблюдениях, изменяют нагрузки, величины ходов, рабочие участки, продолжительности циклов и другие факторы. Почти все стенды автоматизированы. Для управления движениями рабочих органов применяют конечные переключатели и кулачки.

Рассмотрим примеры стендов. На рис. 6. 10 изображена схема стенда для испытаний на долговечность силовых головок [3]. Силовая головка 2 во время рабочего хода нагружается крутящим моментом и осевым усилием. Тормозной крутящий момент создается генератором постоянного тока 3. Выработываемый им ток поступает в магазин сопротивлений. Крутящий момент регулируется силой тока в цепи возбуждения. Осевое усилие создается давлением масла, поступающего в цилиндр 1.

На рис. 6.11, а приведена принципиальная схема стэнда с программным нагружением для испытания коробок скоростей универсальных станков. Асинхронный электродвигатель 1 приводит две одинаковые коробки скоростей 2 и 3. Тормозной крутящий момент создается

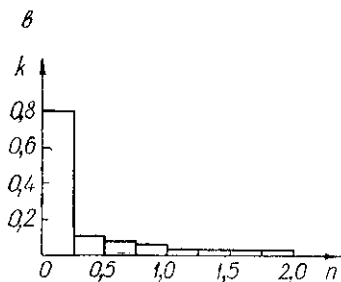
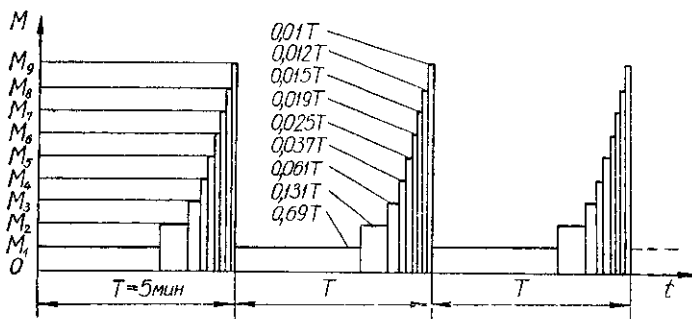
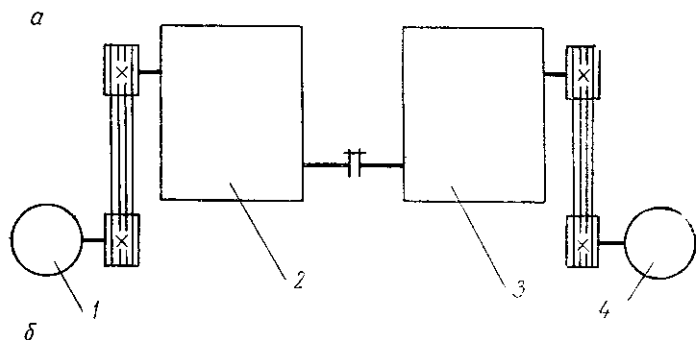


Рис. 6.11. Схема стэнда для испытаний коробок скоростей универсальных станков

генератором постоянного тока 4. При автоматическом ступенчатом изменении силы тока в цепи возбуждения регулируется величина тормозного момента по программе, изображенной на рис. 6. 11, б. Время действия нагрузки убывает по гиперболе с ростом ее величины. Режим нагружения соответствует распределению времени работы универсальных токарных и фрезерных станков при различных значениях мощности на шпинделе. Это распределение выявлено при статистическом анализе нагруженности универсальных токарных и фрезерных станков в эксплуатационных условиях (рис. 6. 11, в:  $k$  — время в долях от общего времени работы станков;  $n$  — отношение используемой мощности к номинальной мощности на шпинделе). Для сокращения времени испытаний наибольший крутящий момент ( $M_0$  на рис. 6. 11, б) выбран таким, чтобы напряжение в самом слабом звене испытываемого узла было в 2—3 раза больше расчетного, возникающего в эксплуатационных условиях [32].

**Подготовка к стендовым испытаниям.** При подготовке к испытаниям необходимо выполнить эксплуатационные наблюдения за объектами, предназначенными для испытания, а также проанализировать публикации и работы научно-исследовательских организаций. На основании предварительного изучения объекта устанавливается наиболее вероятная схема потери им работоспособности, а также определяются режимы предстоящих стендовых испытаний. В частности, решаются вопросы о величине, месте приложения и направлении сил, о способе нагружения, методах ускорения испытаний и т. д.

Располагая всеми этими данными, можно приступать к проектированию новых стендов или к испытаниям на существующих.

Условия стендовых испытаний за исключением жесточаемого параметра должны соответствовать эксплуатационным. В противном случае показатели надежности изделий, характеристики износостойкости поверхностей образцов и сопряжений, полученные при испытаниях на стендах, невозможно сопоставить с эксплуатационным режимом.

В большинстве случаев параметры условий, выбранных для стендовых испытаний, равны средним значениям, полученным эксплуатационными наблюдениями.

Нужно иметь в виду следующее обстоятельство. При сборе статистических данных встречаются случаи нарушения норм эксплуатации и ремонта станков, в результате чего наблюдаются повышенная загрязненность рабочей жидкости и смазочных масел, использование станка не по назначению и др. Режим стендовых испытаний необходимо разрабатывать на основании результатов, полученных для нормальных условий эксплуатации станка с учетом эксплуатационных требований, установленных техническими документами.

Если невозможно получить статистические данные об эксплуатации, то условия и режимы стендовых испытаний, например узлов и станков новой конструкции, назначают исходя из наиболее вероятных условий работы.

Количество испытываемых объектов должно быть достаточным для получения достоверных результатов и минимальным — для сокращения затрат на испытания и получения информации о надежности в самые короткие сроки.

Число изделий, выбираемых для испытаний, зависит от множества факторов: поставленной задачи, масштаба выпуска изделий, стоимости одного изделия, рассеивания измеряемой величины, закона ее распределения, наличия времени на проведение испытаний, стоимости испытания одного изделия и др.

При ускоренных испытаниях можно ограничиться испытаниями 2—4 станков в целом, 2—8 отдельных узлов, 4—16 отдельных деталей [42].

## 6. 5. Пути сокращения продолжительности стендовых испытаний

Время на проведение стендовых испытаний включает следующие затраты: 1) время на подготовку испытаний  $T_{п}$  (анализ литературных источников, разработка методики испытаний, проектирование стендов и т. д.); 2) основное время  $T_{о}$ , в течение которого исследуемый объект находится на стенде под нагрузкой; 3) время  $T_{изм}$ , затрачиваемое на измерения контролируемых параметров исследуемого объекта; 4) время  $T_{обс}$ , затрачиваемое на ремонт, техническое обслуживание стенда и на изменение режима испытаний; 5) время простоев

стенда  $T_{пр}$  по организационным причинам и в нерабочие смены.

Следует искать возможности для сокращения этих затрат. Время  $T_{изм}$  можно сэкономить путем оснащения стендов автоматическими устройствами для измерения в процессе работы температуры в зоне трения, износа сопряженных деталей, температуры смазочного масла и др. Если такие устройства отсутствуют, для выполнения измерений приходится останавливать стенд или частично разбирать его. Сокращение составляющей  $T_{обс}$  может быть достигнуто с помощью устройств, которые позволяют в процессе испытаний регулировать нагрузку и характеристики рабочей среды.

Время  $T_0$  является основным слагаемым и часто составляет 50—80% от общих затрат времени. В связи с этим возникает задача так спроектировать стендовые испытания, чтобы за время  $T_0$  оценить надежность исследуемого объекта, которую он будет иметь в течение более продолжительного времени  $t$  использования объекта по назначению. Испытания, для которых  $T_0 < t$ , называются ускоренными.

Ускоренные испытания можно разделить на три группы [30]:

1) испытания, при которых режим работы испытываемого объекта или характеристики среды ужесточены по сравнению с нормальными условиями, так что в ходе испытаний отказы объектов появляются быстрее, чем в эксплуатации;

2) испытания, при которых режим не отличается от нормальных условий эксплуатации, а сокращения времени испытаний добиваются применением статистических методов;

3) испытания, которые характеризуются и ужесточением режима работы, и использованием статистических методов.

## 6. 6. Ускорение испытаний ужесточением характеристик среды или режима работы

**Ужесточение характеристик среды.** Характеристиками среды являются концентрация, гранулометрический и химический составы загрязнений, температура, внешние вибрации и др. Характеристики среды допускается уже-

сточать только тогда, когда ускорение процессов изнашивания, старения и других не приводит к изменению характера физических явлений по сравнению с эксплуатационным режимом.

Разработаны методики ускоренных испытаний гидравлических аппаратов, насосов и гидродвигателей, основанные на введении в рабочую жидкость искусственных абразивных загрязнителей. Ускорение испытаний электрических аппаратов и машин достигается повышением температуры, способствующим старению изоляции.

**Ужесточение режима работы.** Основными способами ужесточения режима работы по сравнению с нормальным являются увеличение частоты рабочего цикла, увеличение нагрузки, воспроизведение тех элементов цикла, которые наиболее сильно влияют на работоспособность изделия.

Увеличение частоты рабочего цикла приводит к сокращению времени испытаний конечных переключателей, реле, пружин [3], силовых столов [15] и всех тех узлов, для которых имеют место простои в цикле машины. Например, работа подводного стола занимает 25% от времени цикла вертикально-протяжного станка, а работа под нагрузкой — только 17%. Поэтому с увеличением частоты цикла стола время, затрачиваемое на его испытание, значительно сокращается.

При чрезмерном увеличении частоты рабочего цикла изменяется температурный режим исследуемого объекта, и это является основным ограничением применения этого способа испытаний.

**Воспроизведение наиболее опасных элементов рабочего цикла.** Многие узлы машины в различные моменты цикла теряют работоспособность в разной степени. Например, гидродинамические подшипники изнашиваются в основном в моменты пуска. Поэтому частые пуски и остановки вала дают возможность относительно быстро испытывать эти подшипники на износостойкость.

Увеличение нагрузки рекомендуется применять при испытаниях деталей, сопряжений и простейших узлов станков. Для таких объектов разработаны методы пересчета на нормальный режим показателей надежности, полученных при ужесточенном режиме. В настоящее время не существует аналогичных методов, от-

носящихся к станкам в целом или к их сложным узлам, и испытания с увеличенной нагрузкой позволяют выявить только самые слабые места в таких объектах. Имеется несколько схем изменения нагрузки на испытываемое изделие (рис. 6.12). К изделию может прикладываться за время испытаний постоянная нагрузка, большая, чем эксплуатационная (см. рис. 6.12, б). Например,

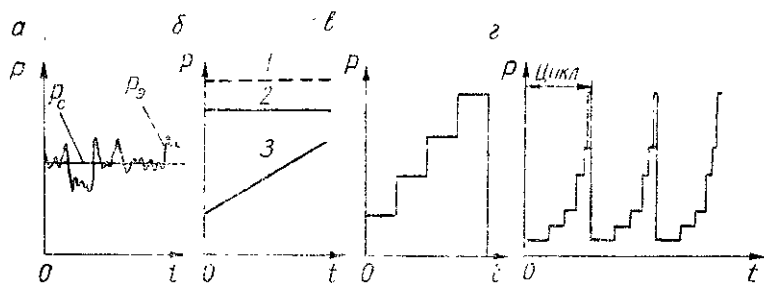


Рис. 6.12. Изменение нагрузки при эксплуатации (а) и испытаниях изделий (б, в, г):

$P_з$  — характер изменения эксплуатационной нагрузки;  $P_с$  — средний уровень нагрузки; 1 — предельная нагрузка; 2 — постоянная нагрузка, большая средней эксплуатационной; 3 — равномерно возрастающая нагрузка; в, г — ступенчатое изменение нагрузки при испытаниях изделий

направляющие качения станков испытывают на долговечность при увеличенной силе нагружения, а шариковые винтовые пары — при повышенных скорости вращения винта и тяговом усилии.

Для того чтобы не изменить характера физических процессов в изделии, нагрузка должна быть выбрана меньше допустимой, зависящей от множества факторов. Для направляющих станков и других сложных сопряжений и узлов предельно допустимая нагрузка определяется жесткостью сопрягаемых деталей, условиями выделения и отвода тепла, динамическими свойствами узла. При выборе нагрузки приходится также учитывать некоторые специфические требования. Например, нагрузку на направляющие станка можно увеличивать до такого предела, чтобы форма изношенных направляющих (эюра износа), полученная при жесточайшем режиме испытаний, существенно не отличалась от формы, характерной для нормальных условий.

Это требование к исследованию направляющих обу-

словлено, во-первых, тем, что форма направляющих в значительной степени определяет точность обработки, а во-вторых, увеличение нагрузки может приводить к изменению эпюры износа в связи с изменениями перекосов, площадей соприкосновения деталей, условий смазки.

Часто при испытаниях нагрузка изменяется по определенной программе. При этом может воспроизводиться полный спектр эксплуатационных нагрузок или некоторое приближение к нему. Применение программированного режима приближает результаты испытаний к результатам эксплуатации и во многих случаях уменьшает время испытаний.

## 6. 7. О статистических методах обработки наблюдений

В ходе испытаний или эксплуатационных наблюдений исследователь получает выборку  $x_1, x_2, \dots, x_n$  объема  $n$ . Элементы выборки могут представлять собой числа отказов изделия на определенном интервале времени, величины линейного износа за определенное время, значения наработки до первого отказа, значения времени восстановления изделия и т. д.

Методы математической статистики позволяют по свойствам выборки сделать выводы о свойствах генеральной совокупности [35]. Одной из задач математической статистики является оценка параметров распределения генеральной совокупности. Кратко опишем решение этой задачи. По выборке можно определить так называемые точечные оценки параметров распределения.

Например,  $\bar{x}$  и  $\bar{s}^2$ , вычисленные по формулам (1.1) и (1.2), являются точечными оценками математического ожидания  $a$  и дисперсии  $\sigma^2$  генеральной совокупности.

Располагая точечной оценкой  $\alpha_0$ , ничего нельзя сказать о точности, с которой произведена оценка соответствующего параметра  $\alpha$  генеральной совокупности. Поэтому наряду с точечной оценкой  $\alpha_0$  применяется доверительный интервал  $(\alpha_0 - \delta_1, \alpha_0 + \delta_2)$ , в котором с высокой вероятностью  $1-p$  будет находиться истинное значение параметра  $\alpha$  генеральной совокупности. Число  $p$  является наибольшим значением вероятностей, при которых событие считается практически невозможным, и называется *уровнем значимости*. Величина  $1-p$  называется *доверительной вероятностью*.

Обозначим отклонение выборочного параметра  $\alpha_0$  от



исследуемого генерального  $\alpha$  через  $\Delta\alpha$ . Пусть  $f(x)$  и  $F(x)$  есть плотность и функция распределения случайной величины  $\Delta\alpha$ , а  $\delta$  — некоторое положительное число. Обозначим вероятность того, что  $|\Delta\alpha|$  не превосходит  $\delta$ , через  $P\{|\Delta\alpha| \leq \delta\}$ . Имеем

$$P\{|\Delta\alpha| \leq \delta\} = P\{|\alpha - \alpha_0| \leq \delta\} = P\{\alpha_0 - \delta \leq \alpha \leq \alpha_0 + \delta\};$$

$$P\{\alpha_0 - \delta \leq \alpha \leq \alpha_0 + \delta\} = \int_{-\delta}^{\delta} f(x) dx = F(\delta) - F(-\delta).$$

Таким образом, располагая  $f(x)$  или  $F(x)$ , легко вычислить вероятность неравенства

$$\alpha_0 - \delta \leq \alpha \leq \alpha_0 + \delta.$$

При оценке надежности часто решается обратная задача: по заданной вероятности  $p$  определяют доверительные границы. Обычно решение этой задачи имеет вид

$$\Psi_1(v_{1-\frac{p}{2}}) \leq \alpha \leq \Psi_2(v_{1+\frac{p}{2}}),$$

где  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  — некоторые функции;

$v_{1-\frac{p}{2}}$  и  $v_{1+\frac{p}{2}}$  — симметричные квантили распределения некоторой случайной величины  $v$ ;

$\alpha$  — оцениваемый параметр распределения генеральной совокупности.

*Квантилем  $v_p$  случайной величины  $v$ , имеющей функцию распределения  $F(x)$ , называется такое значение случайной величины  $v$ , при котором  $P\{v < v_p\} = p$ . Другими словами,  $v_p$  есть решение уравнения  $F(v_p) = p$ . Квантиль  $v_p$  называется  $p \cdot 100\%$ -ным квантилем. Квантили того или иного распределения находятся по статистическим таблицам.*

Другая важная задача математической статистики состоит в проверке статистических гипотез. *Статистической гипотезой* называется некоторое предположение о значениях генеральных статистических характеристик или о неизвестном распределении  $F(x)$  той или иной величины. По данным выборки вычисляются некоторые статистические показатели, называемые *критериями*

проверки. Пользуясь этими критериями, исследователь устанавливает, соответствуют ли экспериментальные данные выдвинутой гипотезе. По результатам проверки гипотеза может быть либо отвергнута, либо не отвергнута.

Гипотеза называется *параметрической*, если функция распределения  $F(x)$  задана отдельными параметрами и строится относительно этих параметров. Выдвигаются также гипотезы другого вида, основой которых не являются допущения о конкретном виде распределения. Эти гипотезы называются *непараметрическими*. С их помощью проверяется наличие предполагаемой функции распределения.

## 6. 8. Статистическая оценка параметров распределения

**Интервальная оценка среднего значения.** В результате изучения надежности изделия получили ряд независимых наблюдений случайной величины  $X: x_1, x_2, \dots, x_n$ . По формулам (1.1) и (1.2) вычислены выборочное среднее  $\bar{x}$  и выборочная дисперсия  $s^2$ . Требуется найти интервальную оценку генерального среднего  $a$  при уровне значимости  $p$ .

Если наблюдаемая случайная величина  $X$  имеет нормальное распределение, оценка генерального среднего  $a$  определяется выражением:

$$\bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{1-\frac{p}{2}} \ll a \ll \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{1-\frac{p}{2}}, \quad (6.1)$$

где  $n$  — объем выборки;  
 $t_{1-\frac{p}{2}}$  — квантиль  $t$ -распределения (распределения Стьюдента), взятый для  $f=n-1$  степеней свободы.

Как известно, величина  $t$  задается выражением

$$t = \frac{\bar{x} - a}{s} \sqrt{n}.$$

Распределение величины  $t$  зависит от числа степеней свободы, свойственного дисперсии  $s^2$ . Квантили распределения Стьюдента приведены в приложении 2.

**Пример.** Проведены наблюдения за 20 станками и получены следующие величины их срока службы (в месяцах двухсменной работы) до выхода за пределы норм точности: 20, 21, 21, 15, 18, 20, 24, 19, 23, 22, 16, 19, 23, 21, 20, 24, 21, 26, 22, 25.

Найти интервальную оценку генерального среднего  $a$  срока службы станков при условии, что срок службы подчиняется нормальному распределению. Принять уровень значимости  $p=0,10$ .

Точечная оценка среднего срока службы

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{20} x_i = \frac{1}{20} (20+21+\dots+25) = 21;$$

точечная оценка дисперсии

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{20} (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{19} [(20-21)^2 + (21-21)^2 + \dots + (25-21)^2] = 7,4;$$

выборочное среднее квадратическое отклонение

$$s = \sqrt{s^2} = 2,7.$$

При  $p=0,10$  и числе степеней свободы  $f=n-1=19$  по табл. 2 приложения имеем  $t_{1-\frac{p}{2}} = t_{0,95} = 1,73$ .

Получаем оценку:

$$21 - \frac{2,7}{\sqrt{20}} \cdot 1,73 < a < 21 + \frac{2,7}{\sqrt{20}} \cdot 1,73,$$

или приближенно  $20 < a < 22$ .

Так как  $p=0,10$ , полученное неравенство может оказаться ошибочным не более чем в 10 случаях из 100.

Если случайная величина  $X$  распределена экспоненциально, доверительный интервал для ее среднего значения определяется по формуле

$$\frac{2\bar{x}n}{\chi^2_{\frac{p}{2}}} < a < \frac{2\bar{x}n}{\chi^2_{1-\frac{p}{2}}}, \quad (6.2)$$

где  $\chi^2_{\frac{p}{2}}$ ,  $\chi^2_{1-\frac{p}{2}}$  — квантили распределения  $\chi^2$  (распределения Пирсона) с  $2n$  степенями свободы.

Для выборки с элементами  $x_1, x_2, \dots, x_n$  через  $\chi^2$  обозначается сумма

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^2 = \frac{fs^2}{\sigma^2},$$

где  $f=n-1$  — число степеней свободы.

Квантили распределения случайной величины  $\chi^2$  даны в приложении 3, 4.

**Пример.** Нарботка (в минутах) между последовательными отказами автоматической линии равна 20, 20, 5, 5, 5, 5, 15, 15, 5, 20, 40, 5, 5, 10, 10, 25, 10, 5, 5, 10, 30, 25, 10, 10, 10, 5, 15, 20, 5, 25, 5, 25, 15, 15, 15, 20, 5.

Распределение наработки между отказами экспоненциальное.

Найти доверительный интервал для наработки на отказ  $T$  при уровне значимости  $p=0,10$ .

Объем выборки  $n=37$ ,  $\bar{x}=13,5$  мин. При  $p=0,10$  и числе степеней свободы  $2n=74$  по приложениям 3,4 имеем:

$$\chi^2_{\frac{p}{2}} = \chi^2_{0,05} = 95,1; \quad \chi^2_{1-\frac{p}{2}} = \chi^2_{0,95} = 55,2.$$

По формуле (6.2) получаем

$$\frac{2 \cdot 13,5 \cdot 37}{95,1} < T < \frac{2 \cdot 13,5 \cdot 37}{55,2},$$

или  $10,4 < T < 17,9$

**Интервальная оценка дисперсии  $\sigma^2$ .** Доверительный интервал для  $\sigma^2$  строится с помощью  $\chi^2$ -распределения. Если случайная величина  $X$  распределена нормально, двусторонняя доверительная оценка генеральной дисперсии задается неравенством

$$\frac{\hat{s}^2}{\chi^2_{1-\frac{p}{2}}} < \sigma^2 < \frac{\hat{s}^2}{\chi^2_{\frac{p}{2}}}$$

## 6.9. Проверка статистических гипотез

**Сравнение дисперсий.** Пусть сделаны две выборки. Одна выборка из генеральной совокупности с дисперсией  $\sigma_1^2$  (дисперсия этой выборки  $s_1^2$  имеет  $f_1 = n_1 - 1$  степеней свободы); вторая — сделана из генеральной совокупности с дисперсией  $\sigma_2^2$  и характеризуется выборочной дисперсией  $s_2^2$  при числе степеней свободы  $f_2 = n_2 - 1$ . Необходимо выяснить, являются ли выборочные дисперсии  $s_1^2$  и  $s_2^2$  оценками одной и той же генеральной дисперсии при уровне значимости  $p$ . Выдвигается гипотеза о равенстве генеральных дисперсий:  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ , которая называется *нулевой гипотезой*.

Для проверки этой гипотезы применяется отношение

$$F = \frac{s_1^2}{\sigma_1^2} : \frac{s_2^2}{\sigma_2^2}, \quad (6.3)$$

где  $s_1^2 = \max(s_1^2, s_2^2)$ .

Распределение величины  $F$  называется *F-распределением Фишера*, квантили его приведены в приложении 5. В случае нулевой гипотезы

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 \text{ и } F = s_1^2 : s_2^2.$$

Если по смыслу эксперимента неравенство  $\sigma_1^2 < \sigma_2^2$  не выполняется, нулевая гипотеза отвергается при  $\frac{s_1^2}{s_2^2} > F_{1-p}(f_1, f_2)$ .

Если заранее неизвестно соотношение между  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$ , нулевая гипотеза отвергается при  $\frac{s_1^2}{s_2^2} > F_{1-\frac{p}{2}}(f_1, f_2)$ .

Пусть теперь надо сравнить  $k$  дисперсий ( $k > 2$ ) при уровне значимости  $p$ . Сравнение осуществляется с помощью критерия Кохрана. При этом сравнивается отношение

$$G = \frac{\max(s_1^2, s_2^2, \dots, s_k^2)}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_k^2} \quad (6.4)$$

с квантилем  $G_{1-p}$  распределения Кохрана (табл. 6 приложения). Если  $G > G_{1-p}$ , нулевая гипотеза отвергается.

**Сравнение средних.** Пусть взяты две выборки:  $x_1, x_2, \dots, x_{n_1}$  и  $y_1, y_2, \dots, y_{n_2}$  из двух различных генеральных совокупностей с генеральными средними  $a_1, a_2$  и дисперсиями  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$ . Средние и дисперсии выборок:  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ ,  $s_1^2$  и  $s_2^2$ .

Предположим, что генеральные совокупности распределены нормально. В зависимости от соотношения между  $s_1^2$  и  $s_2^2$  возможны два случая. Первый из них характеризуется тем, что  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$  (это устанавливается по экспериментальным данным с помощью критерия Фишера). Тогда средневзвешенная дисперсия определяется по формуле

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (6.5)$$

и имеет  $f = n_1 + n_2 - 2$  степеней свободы.

Нулевая гипотеза  $a_1 = a_2$  отвергается, если

$$|\bar{x} - \bar{y}| \geq t_{1-\frac{p}{2}} s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (6.6)$$

при двустороннем критерии или

$$|\bar{x} - \bar{y}| \gg t_{1-p} s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (6.7)$$

при одностороннем критерии. Здесь используются квантили распределения Стьюдента с  $f = n_1 + n_2 - 2$  степенями свободы.

Во втором случае, когда  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ , нулевая гипотеза отвергается при

$$|\bar{x} - \bar{y}| > \frac{\frac{s_1^2}{n_1} t_{1-\frac{p}{2}, f_1} + \frac{s_2^2}{n_2} t_{1-\frac{p}{2}, f_2}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (6.8)$$

Здесь используются квантили распределения Стьюдента с  $f_1 = n_1 - 1$  и  $f_2 = n_2 - 1$  степенями свободы.

Если в последнем неравенстве заменить  $\frac{p}{2}$  на  $p$ , этот двусторонний критерий превращается в односторонний.

Задачу о сравнении средних приходится решать при рассмотрении влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на изменение показателей надежности изделий.

**Проверка гипотез о виде распределений.** Эта проверка является одной из важных задач, возникающих при обработке результатов испытаний на надежность и износостойкость. Эту задачу можно решать аналитически и графически. Здесь рассмотрим графический метод проверки гипотез с использованием вероятностной бумаги [7]. Графический метод позволяет избежать больших расчетов, но является приближенным.

Вероятностная бумага нормального распределения (нормальная бумага) изображена на рис. 6.13. На оси абсцисс откладывается время, на оси ординат — накоп-

ленные частоты. Правила пользования вероятностной бумагой рассмотрим на примере.

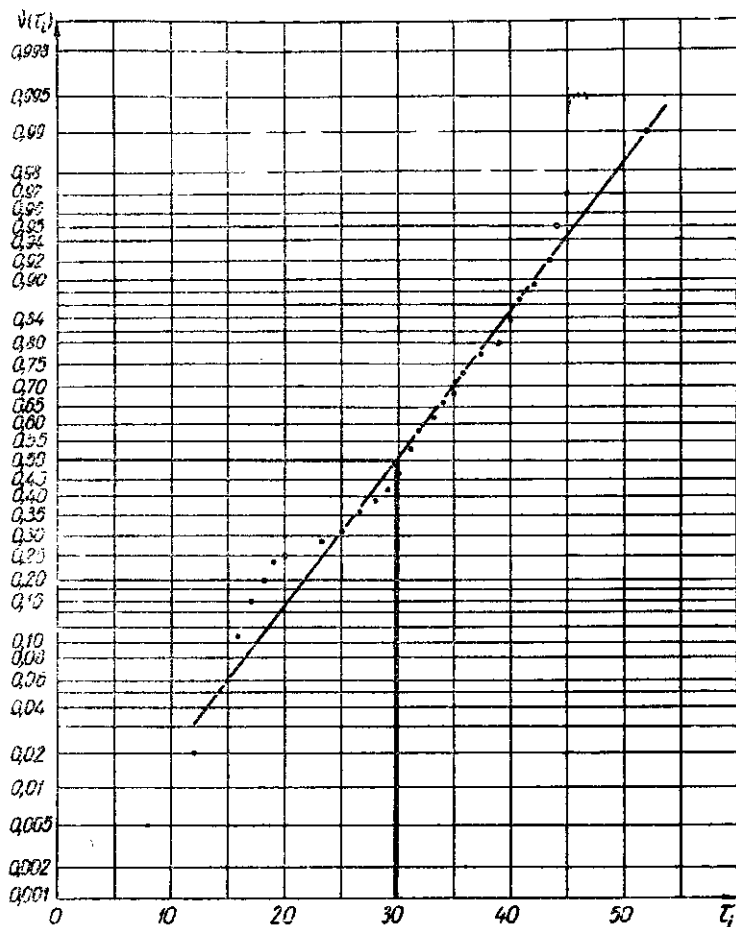


Рис. 6. 13. Вероятностная бумага нормального распределения

**Пример.** При обследовании 50 станков получены значения сроков службы  $\tau_i$  до выхода за пределы норм точности. Сроки службы, выраженные в месяцах двухсменной работы, занесены в табл. 6. 1.

С помощью нормальной бумаги проверить гипотезу о нормальном распределении сроков службы и в случае, если эта гипотеза не будет отвергнута, оценить параметры распределения  $T$  и  $\sigma$ .

**Табл. 6. 1. Данные о сроках службы станков до выхода за пределы норм точности**

Срок службы в месяцах двухсменной работы, $\tau_i$	Накопленная частота, $\nu(\tau_i)$	Срок службы в месяцах двухсменной работы, $\tau_i$	Накопленная частота, $\nu(\tau_i)$
12	0,01	31	0,51
12	0,03	31	0,53
15	0,05	31	0,55
15	0,07	32	0,57
16	0,09	32	0,59
16	0,11	33	0,61
16	0,13	33	0,63
17	0,15	34	0,65
17	0,17	34	0,67
18	0,19	35	0,69
18	0,21	36	0,71
19	0,23	36	0,73
20	0,25	36	0,75
23	0,27	37	0,77
25	0,29	39	0,79
25	0,31	39	0,81
25	0,33	40	0,83
27	0,35	40	0,85
27	0,37	41	0,87
28	0,39	42	0,89
29	0,41	43	0,91
29	0,43	43	0,93
30	0,45	44	0,95
30	0,47	45	0,97
30	0,49	52	0,99

На бумаге нормального распределения откладываем точки  $(\tau_i, \nu(\tau_i))$ , при этом накопленные частоты  $\nu(\tau_i)$  можно вычислить по формуле

$$\nu(\tau_i) = \frac{i-0,5}{N}, \quad (6.9)$$

где  $i$  — порядковый номер;  
 $N$  — общее число данных.

Для равных друг другу величин  $\tau_i$  откладываем среднее арифметическое частот, соответствующих одинаковым значениям  $\tau$ . Известно, что на нормальной бумаге функция нормального распределения изображается прямой линией. Поэтому гипотеза о нормальном распределении не отвергается, когда экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую. В противном случае гипотезу о нормальном распределении следует отбросить.



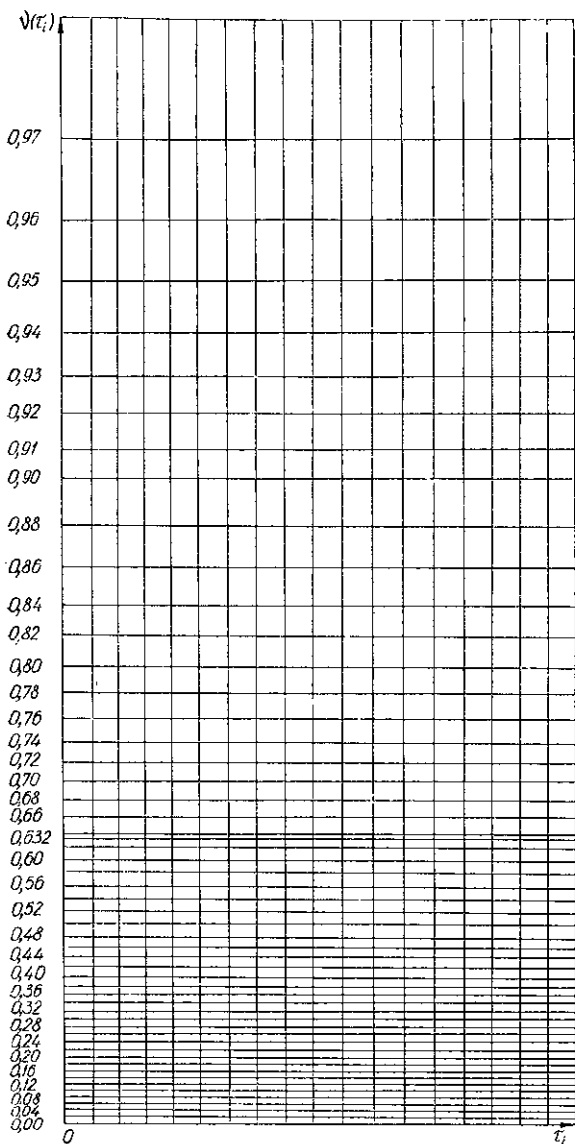


Рис. 6. 14. Вероятностная бумага экспоненциального распределения

В рассмотренном примере гипотеза о нормальном распределении сроков службы станков не отвергается.

По графику найдем оценки  $T$  и  $\sigma$ . Параметр  $T$  равен абсциссе точки с ординатой 0,5. Параметр  $\sigma$  равен разности абсцисс точек с ординатами 0,5 и 0,159. Для рассмотренной совокупности точек получаем  $T=30$  мес;  $\sigma=30-20,7=9,3$  мес.

На рис. 6.14 изображена экспоненциальная вероятностная бумага. Функция экспоненциального распределения изображается на ней прямой линией. Если экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую, можно считать, что исходные данные согласуются с гипотезой экспоненциального распределения.

Параметр  $\lambda$  оценивается по формуле

$$\lambda = \frac{1}{\tau_0}, \quad (6.10)$$

где  $\tau_0$  — значение времени  $\tau$ , соответствующее ординате 0,632.

## 6.10. Многофакторные испытания на надежность

Изучая воздействие конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на работоспособность изделия, исследователь выполняет несколько серий экспериментов. В каждой серии варьируется только один фактор, а остальные поддерживаются постоянными. Такие эксперименты можно назвать *однофакторными*.

Традиционная методика однофакторного экспериментирования имеет существенные недостатки. Во-первых, из-за множества воздействующих факторов эксперименты длительны, требуют испытания большого количества объектов и, следовательно, дороги. Во-вторых, результаты экспериментов выражаются многочисленными таблицами, простейшими формулами, графиками, которые не являются удобными формами выражения информации о надежности объектов и иногда не позволяют объяснить полученные результаты и оптимизировать изучаемый процесс. В-третьих, из-за большой продолжительности испытаний информация может запоздать и возможны экспериментальные ошибки, которые возникают в основном в результате неконтролируемых изменений свойств материалов.

Поэтому при изучении надежности стали применять методы математического планирования экспериментов, основанные на одновременном изменении всех исследуемых факторов по определенному плану, так называемые *многофакторные эксперименты*. Новая методика позволяет избежать всех недостатков, характерных для однофакторных экспериментов, и во много раз повышает эффективность исследовательской работы.

Математическое планирование экспериментов выполняют в два этапа. На первом этапе предварительно изучается объект. Сюда относятся рассмотрение результатов ранее выполненных работ, изучение литературных источников, опрос специалистов. Статистическая обработка этой информации, называемая *априорным ранжированием факторов*, позволяет сформулировать цели исследования, обосновать выходные параметры, выбрать наиболее значимые факторы, интервалы их варьирования и т. д. Факторы, мало влияющие на выходные параметры, исследователь может исключить с помощью специальных отсеивающих экспериментов, которые целесообразно планировать по методу случайного баланса [27].

На втором этапе исследователь устанавливает зависимость между каждым выходным параметром  $y$  и совокупностью независимых переменных  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , называемых *факторами*:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (6.11)$$

Функцию  $y$  называют *функцией отклика* и обычно представляют в виде полинома:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots,$$

где  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}, \dots$  — теоретические коэффициенты регрессии.

После выполнения экспериментов получают оценки  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}, \dots$  теоретических коэффициентов регрессии и уравнение регрессии

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (6.12)$$

где  $y$  — расчетное значение выходного параметра  $y$ .

В зависимости от того, каким числом членов в пра-

вой части уравнения (6.12) ограничивается исследованием при изучении объекта, он может получить различные математические модели объекта: линейную, линейную с учетом парных взаимодействий факторов, квадратичную и др.

Для примера рассмотрим получение линейной зависимости между параметром  $y$  и тремя факторами  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  с применением одного из методов математического планирования экспериментов — полного факторного эксперимента (ПФЭ). Метод ПФЭ характеризуется тем, что при выполнении экспериментов каждый фактор устанавливают только на двух уровнях, а экспериментальные точки представляют собой все возможные сочетания факторов.

Искомое уравнение регрессии имеет вид

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3. \quad (6.13)$$

Переходим от натуральных переменных  $x_1, x_2, x_3$  к переменным, выраженным в нормированном масштабе:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{m_i} \quad (i=1, 2, 3), \quad (6.14)$$

где  $z_i$  — значение фактора  $x_i$  в нормированном масштабе;

$\bar{x}_i$  — среднее значение фактора  $x_i$ ;

$m_i$  — интервал варьирования  $x_i$  относительно  $\bar{x}_i$ .

Верхнему уровню фактора соответствует  $z_i = +1$ , нижнему —  $z_i = -1$  (рис. 6.15). Экспериментальные точки задаются табл. 6.2, называемой *матрицей планирования экспериментов*.

$x_{i \min}$	$m_i$	$\bar{x}_i$	$m_i$	$x_{i \max}$	Фактор $x_i$ в натуральном масштабе
-1		0		+1	Фактор $x_i$ в нормированном масштабе

Рис. 6.15. Уровни фактора  $x_i$  в натуральном и нормированном масштабах

Как следует из данной таблицы, при выполнении первого опыта все факторы должны быть установлены на нижних уровнях; во втором опыте фактор  $x_1$  нужно уста-

Т а б л. 6. 2. Матрица планирования экспериментов

Номера опытов	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y$
1	-1	-1	-1	
2	+1	-1	-1	
3	-1	+1	-1	
4	+1	+1	-1	
5	-1	-1	+1	
6	+1	-1	+1	
7	-1	+1	+1	
8	+1	+1	+1	

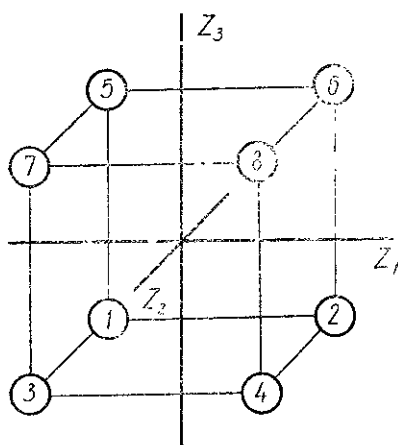


Рис. 6. 16. Расположение экспериментальных точек в пространстве

новить на верхнем уровне, а  $x_2$  и  $x_3$ —на нижних. Экспериментальные точки являются вершинами куба, построенного в факторном пространстве, где координатами служат переменные, выраженные в нормированном масштабе (рис. 6. 16).

Уравнение (6. 13) в нормированном масштабе имеет вид:

$$\hat{y} = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3. \quad (6. 15)$$

Коэффициенты регрессии определяются по формулам:

$$a_0 = \frac{\sum_{u=1}^8 y_u}{8};$$

$$a_i = \frac{\sum_{u=1}^8 z_{iu} y_u}{8},$$

где  $u$  --- номер опыта.

По методу ПФЭ можно получить и более сложное уравнение:

$$\hat{y} = a_0 + a_{1z_1} + a_{2z_2} + a_{3z_3} + a_{12z_1z_2} + a_{13z_1z_3} + a_{23z_2z_3}.$$

Коэффициенты при произведениях переменных выражают взаимодействия между этими факторами и определяются по формуле

$$a_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^8 z_{iu}z_{ju}y_u}{8} \quad (i < j).$$

Используя преобразования (6.14), от уравнения (6.15) можно легко перейти к зависимости (6.13).

Для примера рассмотрим результаты, полученные по методу ПФЭ в работе [48] при изучении предохранительного клапана с переливным золотником типа Г52-12. Изучалось влияние давления масла в системе (фактор  $x_1$ ), температуры масла (фактор  $x_2$ ) и содержания искусственного загрязнителя — абразивного микропорошка М14 (фактор  $x_3$ ) на утечки в золотниковой паре  $y_1$  и износ золотника  $y_2$ . Предохранительные клапаны, работающие в режиме разгрузочного клапана, испытывались на специальном стенде. Значения параметров  $y_1$  и  $y_2$  измерялись после достижения наработки  $2 \cdot 10^4$  циклов. Опыты поставлены в соответствии с табл. 6.2, повторены два раза, их результаты  $y'_1, y''_1, y'_2, y''_2$  зафиксированы в табл. 6.3.

Табл. 6.3. Результаты опытов при исследовании предохранительных клапанов

Номер опыта	$x_1$ , кгс/см <sup>2</sup>	$x_2$ , °С	$x_3$ , %	Утечки в золотниковой паре, см <sup>3</sup> /мин		Износ золотника на сторону, мкм	
				$y'_1$	$y''_1$	$y'_2$	$y''_2$
1	20	40	0	0	0	0,57	0,43
2	60	40	0	7,5	6,5	2,45	3,15
3	20	60	0	3,1	4,9	2,25	1,35
4	60	60	0	8,8	7,2	2,6	3,4
5	20	40	0,0005	0	0,01	1,07	0,93
6	60	40	0,0005	11,5	10,5	4,45	3,55
7	20	60	0,0005	5,5	6,5	3,85	2,75
8	60	60	0,0005	15,5	14,5	6,3	7,7

После расчета коэффициентов регрессии получены уравнения в нормированном масштабе:

$$\hat{y}_1 = 6,37 + 3,87z_1 + 1,87z_2 + 1,62z_3 + 1,12z_1z_3 + 0,62z_2z_3; \quad (6.16)$$

$$\hat{y}_2 = 2,92 + 1,52z_1 + 0,85z_2 + 0,90z_3 + 0,40z_1z_3 + 0,47z_2z_3. \quad (6.17)$$

Зависимости (6.16) и (6.17) выведены с соблюдением всех требований теории эксперимента. Опыты проводились в случайной последовательности, определенной по таблице случайных чисел. По критерию Кохрана проверена однородность дисперсий зависимых переменных во всех экспериментальных точках. По критерию Стьюдента проверена значимость коэффициентов регрессии. Все коэффициенты оказались значимыми за исключением коэффициентов при  $z_2z_3$  в уравнении (6.16), коэффициентов при  $z_1z_3$  и  $z_2z_3$  в уравнении (6.17). Проверка по критерию Фишера показала, что оба уравнения адекватно описывают результаты экспериментов.

Так как в полученных уравнениях коэффициент при  $z_1$  больше других коэффициентов, можно сделать вывод, что наибольшее влияние на износ золотника и утечки в золотниковой паре оказывает давление масла. Влияния температуры масла и его загрязненности оказались приблизительно одинаковыми. В результате испытания 16 клапанов получили математические модели сложных процессов в виде уравнений регрессии, которые могут быть использованы для предсказания явлений при выборе условий работы клапанов, при пересчете результатов испытаний с ужесточенного режима на нормальный. Рассмотренный пример подтверждает преимущества многофакторных экспериментов при испытаниях на надежность.

### 6.11. Последовательные испытания на надежность

Для примера рассмотрим испытание на надежность партии серийно выпускаемых изделий и вынесем решение о принятии или забраковании этой партии. Время безотказной работы изделий распределено экспоненциально. По техническим условиям наработка на отказ изделий должна составлять не менее  $T_1 = 100$  ч, а производство обеспечивает среднее значение наработки на

отказ  $T_0 = 160$  ч. Цель испытаний состоит в том, чтобы выявить, соответствует ли фактический уровень надежности изделий требуемому.

Величина  $T_1$  представляет собой минимально допустимое значение средней наработки на отказ и называется браковочным значением наработки на отказ или

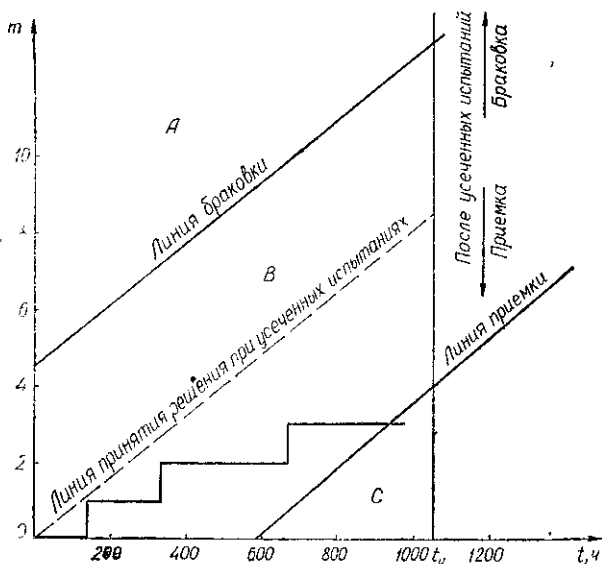


Рис. 6. 17. График последовательных испытаний

браковочным уровнем надежности. Величину  $T_0$  называют приемочным значением наработки на отказ или приемочным уровнем надежности.

Вследствие того что об уровне надежности изделий партии судят по результатам испытаний ее части, возможны две ошибки. Первая ошибка состоит в том, что изделие с наработкой  $T > T_1$  признается имеющим наработку меньше  $T_1$ , вторая в том, что изделие с наработкой  $T < T_1$  считается имеющим наработку больше  $T_1$ .

Вероятность  $\alpha$  первой ошибки называют *риском изготовителя*, вероятность  $\beta$  второй ошибки — *риском потребителя*. Чем меньше  $\alpha$  и  $\beta$ , тем более продолжительны испытания. С увеличением  $\alpha$  и  $\beta$  возрастает вероятность принятия ошибочного решения. Величина  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $T_0$  и  $T_1$  задаются разработчиком, согласовываются с за-



казчиком и изготовителем и указываются в техническом задании на изделие.

Примем в нашем примере  $\alpha = \beta = 0,1$ . Решаем поставленную задачу, применяя так называемый метод последовательных испытаний [1]. Результаты испытаний изображаем графически (рис. 6.17). При этом на оси абсцисс откладываем время испытаний  $t$ , на оси ординат — число отказов изделия  $m$ . На график следует нанести две параллельные прямые. В случае, когда наработки до отказа распределены экспоненциально, уравнения этих прямых (прямые приемки и браковки соответственно) имеют вид:

$$m = \frac{\ln \frac{\beta}{1-\alpha}}{\ln \frac{T_0}{T_1}} + \frac{1}{\frac{T_1}{T_0} - 1} t; \quad (6.18)$$

$$m = \frac{\ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \frac{T_0}{T_1}} + \frac{1}{\frac{T_1}{T_0} - 1} t. \quad (6.19)$$

Для рассматриваемого примера:

$$m = -4,675 + 0,00798t;$$

$$m = 4,675 + 0,00798t.$$

Прямые делят первый квадрант на три зоны: браковки  $A$ , приемки  $C$  и продолжения испытаний  $B$ . Если экспериментальная точка оказалась в зоне  $A$ , испытания следует прекратить, а партию изделий забраковать, так как их наработка на отказ ниже допустимого уровня с вероятностью не меньшей  $1-\alpha$ . Когда экспериментальная точка вышла в зону  $C$ , дальнейшие испытания прекращаются, а партия изделий принимается, так как их наработка на отказ не ниже минимально допустимой с вероятностью не меньшей  $1-\beta$ . Наконец, в третьем случае, когда экспериментальная точка окажется между параллельными прямыми в зоне  $B$ , нельзя сказать ничего определенного об уровне надежности изделий, и испытания следует продолжить. В некоторых случаях экспериментальная точка могла

бы находиться в зоне  $B$  неопределенно долго. Поэтому разработан метод, позволяющий прекращать испытания и выносить определенное решение о надежности партии, когда экспериментальная точка, оставаясь внутри зоны  $B$ , выходит за ранее обусловленные прямые  $t=t_x$  или  $m=m_y$ . Испытания такого вида называют *усеченными*.

Закончим рассмотрение примера. Пусть изделия — неремонтируемые, и испытание первого из них дает  $t_1=131$  ч,  $m_1=1$ . Эта точка оказалась в зоне  $B$ , поэтому испытываем второе изделие. Его наработка до отказа оказалась равной  $t_0=200$  ч, а вторая экспериментальная точка имеет координаты  $t_2=t_1+t_0=331$  ч,  $m_2=2$ . Испытания следует продолжить. Аналогично получена третья точка:  $t_3=672$  ч,  $m_3=3$ . Четвертая точка вышла в зону  $C$ , так что дальнейшие испытания можно прекратить, принять партию изделий и с вероятностью не меньшей  $\gamma=1-\beta=0,9$  считать, что наработка до отказа изделий не меньше  $T_1=100$  ч.

Если время безотказной работы изделий подчиняется нормальному распределению, граничные прямые на рис. 6.17 задаются уравнениями

$$m = \frac{2 \log \frac{\beta}{1-\alpha}}{T_0^2 - T_1^2} + \frac{2(T_0 - T_1)}{T_0^2 - T_1^2} t, \quad (6.20)$$

$$m = \frac{2 \log \frac{1-\beta}{\alpha}}{T_0^2 - T_1^2} + \frac{2(T_0 - T_1)}{T_0^2 - T_1^2} t \quad (6.21)$$

Метод последовательных испытаний на надежность дает статистически обоснованное подтверждение требуемой надежности за минимальное время и при минимальных затратах. Особенностью этого метода является учет результатов, полученных в ходе испытаний.

Рассмотренный метод последовательных испытаний может быть применен и к испытаниям ремонтируемых изделий, имеющихся в единственном экземпляре, например автоматических линий.

Рассмотрим разработанную в Минском СКБ АЛ методику приемосдаточных испытаний автоматических линий, основанную на методе последовательных испы-

таний [45]. За две-три смены последовательные испытания позволяют определить, соответствует ли безотказность линии заданному уровню.

Пусть  $T_1$ —заданное минимальное (браковочное) значение наработки на отказ автоматической линии;  $T_0$  — среднее обеспечиваемое изготовителем значение наработки на отказ автоматических линий, подобных изготовленной  $T$  — истинное значение наработки на отказ изготовленной линии;  $\alpha$ —риск изготовителя, т. е. вероятность забраковывания линии, для которой  $T > T_1$ ;  $\beta$ —риск потребителя, т. е. вероятность приемки линии, для которой  $T < T_1$ .

На графике, подобном изображенному на рис. 6.17, на оси абсцисс откладывается суммарная наработка линии  $t$  за время испытаний, а на оси ординат—суммарное число отказов  $m$ . Можно считать, что наработки линии между отказами распределены экспоненциально и граничные прямые задаются уравнениями (6.18) и (6.19). Зависимость числа отказов линии от продолжительности испытаний изображается ступенчатым графиком. В зависимости от поведения этого графика принимается решение о приемке, браковке или продолжении испытаний линии. В случае забракования изготовитель должен выполнить мероприятия по повышению безотказности линии.

Прямая, параллельная граничным и проходящая через начало координат, позволяет решить вопрос о приемке или браковке линии, когда ступенчатый график продолжает оставаться в зоне  $B$  по истечении достаточно большого, заранее оговоренного времени  $t_y$ , так что требуется применить усечение испытаний по наработке. Если при достижении  $t_y$  последняя экспериментальная точка оказывается выше средней прямой, автоматическая линия бракуется. Когда последняя точка попадает на среднюю прямую или ниже ее, линия принимается.

Необходимые для усеченных испытаний три параллельные прямые могут быть заданы таблицей координат находящихся на них точек. Одну из таблиц, применяемых при испытаниях автоматических линий МЗАЛа, приводим в приложении 7. Она составлена при  $\alpha = \beta = 0,1$  и  $T_1 = T_0 : 2,718$ ; наработка на отказ выражена числом циклов линии.

**Пример.** Пусть задано браковочное значение наработки на отказ  $T_1 = 71,4$  цикла, что соответствует 1,4 отказам на 100 циклов линии. Из приложения 7 следует, что линию нужно принять при безотказной работе в течение первых 250 циклов, при одном отказе в течение 363 циклов, при двух отказах в течение 477 циклов и т. д.

Линию следует забраковать при трех отказах за время, не превышающее 90 циклов, при четырех отказах — не превышающее 204 циклов, и т. д.

## Глава 7. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ В МАШИНОСТРОЕНИИ И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

### 7. 1. ГОСТ 16263—70 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения»

Технический прогресс, производство машин и приборов с высокими показателями точности, надежности и долговечности невозможны без развития метрологии и постоянного усовершенствования техники измерений.

*Метрология* — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Метрология охватывает большой комплекс вопросов, включающих установление и воспроизведение единиц измерений в виде конкретных эталонов, разработку средств и методов измерений, установление способов передачи размера единиц физической величины от эталонов до изделия через целый ряд промежуточных звеньев, обеспечивая соблюдение единства мер.

Основными задачами метрологии являются изучение методов и средств измерений с точки зрения их точности и надежности, осуществление государственного надзора за состоянием измерительных средств в стране.

*Измерение* — нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. При измерении получают информацию об измеряемой величине в виде числового значения этой величины, выраженного в принятых единицах измерения.

Под *контролем* понимают процесс получения и обработки измерительной информации о значениях физической величины для определения ее годности или необходимости введения управляющих воздействий на факторы, влияющие на процесс получения размера физической величины. Во многих случаях (например, при статистическом и активном методах) контроль включает измерение. При качественном контроле измерения отсут-

ствуют, проверяется лишь соответствие действительным значениям геометрических, механических, электрических и других параметров нормированным (допустимым) значениям этих параметров.

## 7.2. Виды средств измерений и контроля

*Средство измерений* — техническое средство, используемое при измерении и имеющее нормированные метрологические свойства.

*Мера* — средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

*Однозначная мера* — мера, воспроизводящая физическую величину одного размера, (например, гиря, плоскопараллельная концевая мера длины).

*Многозначная мера* — мера, воспроизводящая ряд одноименных величин различного размера (например, линейки с миллиметровыми делениями).

*Набор мер* — специально подобранный комплект мер, применяемый отдельно и в различных сочетаниях в целях воспроизведения ряда одноименных величин различного размера (набор плоскопараллельных концевых мер).

*Измерительный прибор* — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

По назначению измерительные приборы разделяются на универсальные и специальные. Специальные приборы предназначаются для измерения одного или нескольких параметров определенного типа изделий.

По числу параметров, проверяемых при одной установке изделия, измерительные приборы разделяются на одномерные и многомерные; по принципу мультипликатора (множительного или преобразующего устройства) — на механические, оптические, электрические, пневматические и другие и приборы, основанные на сочетании указанных принципов, например оптико-механические, электромеханические и др. По способу взаимодействия контактного устройства прибора и измеряемого объекта различают контактные и бесконтактные приборы. По степени механизации процесса измерения различают

неавтоматические, механизированные, полуавтоматические и автоматические измерительные средства.

По воздействию на технологический процесс различают активные и пассивные автоматические средства контроля. Пассивные средства контроля лишь фиксируют размеры деталей, разделяя их на годные, бракованный и брак-неисправимый или сортируют на группы. Эти средства контроля не влияют непосредственно на технологический процесс изготовления деталей.

*Активный контроль* — контроль, результат которого вызывает изменение параметров технологического процесса и влияет на качество выпускаемой продукции. Наиболее характерным видом активного контроля является контроль в процессе обработки, когда средства контроля подают сигнал о достижении заданного размера или автоматически изменяют положения органов оборудования (или режимов обработки), т. е. позволяют управлять точностью технологического процесса. Контроль активными средствами позволяет повысить точность обработки, предупредить появление брака и устранить потери времени на измерение, остановку и пуск оборудования, что сокращает на 10—15% время обработки детали на станках.

### 7.3. Нормирование погрешности измерительных приборов

Характеристику измерительного прибора или отдельного звена можно представить как функцию входного сигнала и его параметров:

$$S = f(x, q_1, q_2, \dots, q_n),$$

где  $x$  и  $S$  — входной и выходной сигналы;

$q_i$  — параметры схемы прибора.

В числе параметров  $q_j$  могут быть геометрические размеры деталей, параметры, характеризующие физические свойства материалов (модуль упругости, удельное электрическое сопротивление, магнитная проницаемость и др.), параметры источников питания (напряжение, частота), параметры окружающей среды (температура, атмосферное давление) и др. В реальных

приборах параметры  $q_i$  отклоняются от идеальных значений вследствие:

1) технологического разброса физических параметров исходных материалов и рассеивания геометрических размеров деталей при их изготовлении;

2) изменения внешних условий (изменения температуры окружающей среды);

3) изменения режима работы электрических и пневматических источников;

4) износа и старения материалов в процессе хранения и эксплуатации прибора и др.

При отклонении  $q_i$  от их идеального значения выходной сигнал  $S$  при постоянном  $x$  изменится на некоторую величину  $\Delta S$ , которая и будет погрешностью, вызванной изменением параметров прибора:

$$S + \Delta S = f(x, q_1 + \Delta q_1, q_2 + \Delta q_2, \dots, q_n + \Delta q_n),$$

где  $\Delta S$  — погрешность прибора;

$\Delta q_i$  — погрешности параметров  $q_i$ , называемые в теории точности *первичными погрешностями*.

Обычно погрешности  $\Delta q$  малы, и при разложении данного выражения в ряд Тейлора ограничиваемся членами первого порядка:

$$\Delta S = \left( \frac{\partial S}{\partial q_1} \right)_0 \Delta q_1 + \left( \frac{\partial S}{\partial q_2} \right)_0 \Delta q_2 + \dots + \left( \frac{\partial S}{\partial q_n} \right)_0 \Delta q_n,$$

где индекс нуль означает, что производные выполняются для идеальных значений  $q_i$ . Производная  $\left( \frac{\partial S}{\partial q_i} \right)_0$  — это коэффициент влияния  $i$ -го параметра на выходной сигнал измерительного прибора.

Поскольку обычно регламентируется точность группы однородных приборов, приходится учитывать случайно-систематический характер погрешности приборов, понимая под таковым случайность погрешности для группы приборов, но систематичность ее для конкретного экземпляра и условий измерения.

При рассмотрении конкретного прибора погрешности параметров  $\Delta q_i$  (или первичные ошибки) имеют определенную величину и при рассмотрении группы однородных приборов эти погрешности переходят в раз-



ряд случайных величин, которые характеризуются следующими величинами:  $\delta_i$  — половиной величины поля допуска на параметр;  $\Delta_{oi}$  — серединой поля допуска; — коэффициентом относительной асимметрии,  $\alpha_i$  — это отношение величины смещения центра группирования отклонений  $\bar{x}_i$  от середины поля допуска к величине его половины:

$$\alpha_i = \frac{\bar{x}_i - \Delta_{oi}}{\delta_i};$$

$\lambda_i$  — относительным среднеквадратическим отклонением, равным  $\frac{\sigma_i}{\delta_i}$ , т. е. отношением среднего квадратического отклонения к половине поля допуска.

Среднее значение ошибки прибора  $\overline{\Delta S_{\Sigma}}$  определяется алгебраической суммой средних значений случайных ошибок, умноженных на соответствующее передаточное отношение; в выражении для среднего значения ошибки прибора участвуют ошибки схемы прибора:

$$\overline{\Delta S_{\Sigma}} = \Delta S_{cx} + \sum_n \left( \frac{\partial S}{\partial q_n} \right)_0 \overline{\Delta q_n} + \sum_s \left( \frac{\partial S}{\partial q_s} \right)_0 \overline{\Delta q_s},$$

где  $\Delta S_{cx}$  — систематическая ошибка, вызванная применением схемы, приближенно осуществляющей заданный закон преобразования;

$\overline{\Delta q_n}$  — среднее значение скалярных ошибок;

$\overline{\Delta q_s}$  — среднее значение модулей векторных ошибок;

$\left( \frac{\partial S}{\partial q_n} \right)_0$ ,  $\left( \frac{\partial S}{\partial q_s} \right)_0$  — среднее значение передаточных отношений.

Обозначим

$$\left( \frac{\partial S}{\partial q_n} \right)_0 = i'_n; \quad \left( \frac{\partial S}{\partial q_s} \right)_0 = i'_s; \quad \alpha = \frac{\bar{x} - \Delta_0}{\delta},$$

тогда

$$\overline{\Delta S_{\Sigma}} = \Delta S_{cx} + \sum_n i'_n (\Delta_{on} + \alpha_n \delta_n) + \sum_s i'_s (\Delta_{os} + \alpha_s \delta_s).$$

После нахождения среднего значения ошибки прибора нужно найти пределы возможного отклонения

ошибки прибора  $\delta S_{\Sigma}$  от среднего значения, характерного для группы приборов:

$$\delta S_{\Sigma} = z \sqrt{\sum_n (i'_n)^2 \lambda_n^2 \delta_n^2 + \sum_s [\lambda_{s1}^2 \delta_{s1}^2 (\lambda_{s2}^2 \delta_{s2}^2 + \bar{x}_s^2) + \lambda_{s3}^2 \delta_{s3}^2 (i'_{s3})^2]}.$$

Практически предельная (полная) ошибка приборов находится из соотношения

$$\Delta S_{\Sigma} = \bar{\Delta S}_{\Sigma} \pm \delta S_{\Sigma}.$$

При  $z=3$  вероятность выхода случайных ошибок прибора за каждую границу составляет 0,0027.

Соответствие между фактической точностью прибора и ее нормой  $[\Delta S]$  характеризуется неравенством

$$\Delta S_{\Sigma} \pm \delta S_{\Sigma} \ll [\Delta S].$$

Погрешности измерительных средств являются в большинстве случаев основными составляющими, оказывающими доминирующее влияние на суммарную погрешность измерения.

На подавляющее большинство измерительных средств разработаны общесоюзные стандарты или технические условия, в которых нормируются погрешности прибора (ГОСТ 8.051—73). Правильным методом нормирования является выделение систематической и случайной составляющих погрешности. Преимуществом такого нормирования является внесение полной ясности в отношении точностных возможностей, которыми обладает измерительное средство.

При нормировании погрешности через средние квадратичные отклонения  $\pm 3\sigma$  принимают во внимание только случайные составляющие погрешности, а систематические — исключаются. В этом случае следует ясно различать приводимые в документах понятия «погрешности прибора» и «погрешности измерения». Если указывается погрешность измерения прибором, имеется в виду погрешность всего метода измерения с учетом не только погрешности прибора, но и погрешности образцов, температурной деформации и т. д. В технической документации на прибор при этом должны быть приведены условия проведения измерений.

Нормирование погрешности  $\pm 3\sigma$  предусматривает прежде всего закон нормального распределения. Прини-

мается, что в 0,27% случаев измерений погрешность может оказаться больше нормируемой величины.

Математическое выражение закона нормального распределения подразумевает бесконечно большое число рассматриваемых событий. Количество измерений прибором за определенный промежуток времени носит ограниченный характер. Опыт определения среднего квадратичного показывает, что практически измеренное значение отклонений при ограниченном количестве измерений всегда оказывается значительно меньше, чем рассчитанные по значениям утроенного среднего квадратичного отклонения. Эти обстоятельства дают основание нормировать случайную составляющую величиной  $\pm 2\sigma$ , или просто  $\pm \sigma$ . В первом случае процент риска, что погрешность может оказаться больше, чем нормируемая величина, возрастает до 5%, во втором— до 35%.

## Глава 8. ДОСТОВЕРНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗНАЧЕНИЯХ ИЗМЕРЯЕМЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 8.1. Достоверность измерительной информации при измерении [19]

Непосредственная цель измерений деталей состоит в оценке их истинных значений, т. е. значений, которые действительно имеются и определяют соответствующие эксплуатационные свойства изделия, например, действительный зазор или натяг сопрягаемых деталей узла машины или прибора.

Измерительный прибор вырабатывает сигнал измерительной информации о значении физической величины в форме, доступной для непосредственного восприятия, причем точность информации определяется погрешностью измерения на этом приборе в данных условиях эксплуатации.

Если  $\overline{\Delta S}$  — систематическая ошибка измерения, а  $\Delta \text{lim} = \pm 3\sigma = \pm \delta S$  — предельная случайная погрешность измерения,

$$P(\bar{a} - \overline{\Delta S} - \frac{\Delta \text{lim}}{\sqrt{n}} \leq a_0 \leq \bar{a} - \overline{\Delta S} + \frac{\Delta \text{lim}}{\sqrt{n}}) = 0,9973,$$

т. е. вероятность того, что после исключения систематической погрешности измерения истинный размер физической величины  $a_0$  отличается от среднего результата измерений  $\bar{a}$  не больше, чем на предельную случайную погрешность измерений  $\Delta \text{lim}$ , деленную на квадратный корень из числа  $n$  повторных измерений.

Величина  $\frac{\Delta \text{lim}}{\sqrt{n}}$  является доверительной границей погрешности результата измерения, т. е. границей интервала, накрывающего с заданной вероятностью погрешность измерения. Если принимать  $\Delta \text{lim} = \pm 2\sigma$ , точность информации, оцениваемая шириной интервала, будет выше, но вероятность, что размер находится именно в этом интервале — ниже и равна 0,95.

## 8. 2. Достоверность измерительной информации о значениях измеряемой величины при пассивном контроле [27]

При контроле проверяется только соответствие действительных значений геометрических, механических, электрических и других параметров нормированным (допустимым) значениям этих параметров. Необходимо стремиться к тому, чтобы погрешность измерения не изменяла установленных предельных размеров проверяемых деталей и входила в поле табличного допуска. Однако это стремление не всегда может быть выполнено в отношении деталей точных классов. Отечественная система допусков построена так, что для изделий 1—4 классов точности разрешается некоторый переход за границу табличного допуска (за счет предельного отклонения износа проходного и отклонений непроходного калибров).

При приемочном контроле погрешность измерения взаимодействует с фактическими размерами и оказывает влияние на окончательные результаты измерения тех деталей, размеры которых близки к границам поля допуска. Практически это условие касается деталей, которые имеют действительные отклонения от границы допуска в зоне, соответствующей погрешности измерения. Таким образом, на результаты измерения оказывает влияние не только его погрешность, но и фактический

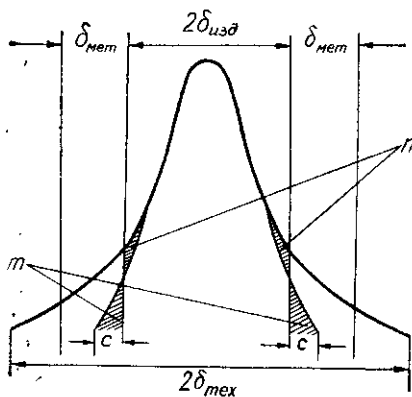


Рис. 8. 1. Достоверность результатов контроля

размер, который имела в этот момент контролируемая деталь. В зависимости от состояния и конструкции измерительного средства и условий проведения измерений погрешность измерения проявляется в определенной закономерности. Действительные размеры обработанных деталей также подчиняются определенным закономерностям, т. е. имеют

определенный закон распределения. Следовательно, сочетание погрешности измерения и действительного размера контролируемой детали является событием случайным и определить результаты неправильной разбраковки при определенном сочетании можно только вероятностным путем.

На рис. 8.1. показан характер искажения кривой распределения отклонения размеров деталей, рассортированных с определенной погрешностью контроля. Эту кривую можно получить после проверки рассортированных деталей новым методом, практически не обладающим погрешностью. Следовательно, при приемочном контроле достоверность измерительной информации определяется вероятностью неправильно принятых бракованных деталей  $m$ , вероятностью забракованных годных деталей  $n$  и возможностью выхода размера за границу поля допуска на величину  $c$ .

Значения  $m$ ,  $n$  и  $c$  зависят от соотношения между контролируемым допуском  $\delta_{\text{изд}}$ , технологическим рассеиванием размеров детали  $\sigma_{\text{тех}}$  и коэффициентом точности измерения  $A_{\text{мет}}$ :

$$A_{\text{мет}} = \frac{\delta_{\text{мет}}}{2\delta_{\text{изд}}},$$

где  $A_{\text{мет}}$  — относительная погрешность метода измерения;

$\delta_{\text{мет}}$  — предельная погрешность метода измерения;

$2\delta_{\text{изд}}$  — поле допуска контролируемого параметра.

Профессором Б. А. Тайцем [21] предлагается способ численного интегрирования с использованием таблиц функции Лапласа  $\Phi(z)$ , с помощью которого производятся ступенчатые определения вероятности сложного события, связанного с возникновением погрешности измерения и появлением детали с определенными отклонениями. Для этого зона технологического распределения размеров контролируемых деталей за границей поля допуска, охватываемого распределением погрешности измерения, разбивается на ряд участков, на такое же количество участков разбивается и кривая распределения погрешности измерения. После этого осуществляется последовательное перемножение площадей этих участков, определенных по таблицам  $\Phi(z)$  при опреде-

ленных значениях  $z$  и суммирование этих произведений за вычетом 0,27% случаев.

Величины  $m$ ,  $n$  и  $c$  можно получить из графических зависимостей, приведенных в [21]. Предельные количества неправильно принятых и забракованных деталей от общего числа проверенных, приводятся в табл. 8.1 и зависят они только от относительной погрешности измерения. Величина выхода размеров за пределы поля допуска имеет экстремальное значение, которое во всех случаях равняется  $\frac{\delta_{\text{мет}}}{2\delta_{\text{изд}}}$ . Экстремальное значение величины выхода за границу поля допуска у неправильно принятых деталей позволяет во многих случаях решить ряд практических задач, связанных с конструированием и выбором измерительных средств.

Табл. 8.1. Погрешности измерения в зависимости от законов распределения размеров контролируемых деталей

Погрешность измерения от допуска $A = \frac{\delta_{\text{мет}}}{\Delta_{\text{изд}}}, \%$	Количество неправильно принятых деталей $m$ для законов распределения, %			Количество неправильно забракованных деталей $n$ для законов распределения, %		
	нормального	существенно-положительных величин	равной вероятности	нормального	существенно-положительных величин	равной вероятности
5	0,4	0,15	1,2	0,6	0,5	1,3
10	1,0	0,7	2,0	1,3	1,0	2,7
15	1,5	1,2	3,25	2,0	1,5	4,0
20	2,0	1,6	4,0	2,8	2,0	5,3
25	2,5	2,0	5,0	3,5	2,5	6,7
30	3,0	2,5	5,5	4,5	3,0	8,0
35	3,5	2,8	6,5	5,5	3,6	9,3
40	4,0	3,3	7,0	6,0	4,2	10,0
45	4,5	3,6	7,5	7,0	4,7	12,0
50	5,0	4,0	8,2	8,0	5,3	13,0

Предельное количество неправильно принятых деталей и определенный выход размеров за границу поля допуска являются для конструктора основными сведениями, с помощью которых он оценивает правильность назначаемых им допусков с учетом влияния погрешности измерения на результаты разбраковки. В общем

случае результаты разбраковки в большей мере зависят от состояния технологического процесса, чем от погрешности измерения. Таким образом, для повышения точности размеров изготавливаемых деталей более целесообразным является не повышение точности измерения, а точности технологического процесса. При этом следует помнить, что уменьшается не только количество неправильно принятых и забракованных деталей, но и действительный брак. Поэтому необходимо стремиться к тому, чтобы технологический процесс обеспечивал изготовление деталей в границах допуска, тогда во многих случаях отпадает надобность в приемочном контроле, а измерительные средства будут использоваться только для анализа состояния технологического процесса и наблюдения за состоянием этого процесса во времени.

### 8.3. Достоверность измерительной информации при активном контроле [6]

Под названием прибора для активного контроля объединяются приборы, контролирующие детали в процессе их изготовления на станке, а также после окончания их обработки (подналадчики). Прогрессивность применения приборов активного контроля заключается в том, что они принимают активное участие в технологическом процессе, в формировании размера детали, и их точность влияет на точность получаемых деталей. Такие приборы являются технологическим оборудованием, составляющим целое с металлорежущим станком и облегчающим процесс обработки.

Вследствие износа контактного элемента прибора и температурной деформации обрабатываемой детали и деталей прибора, а также нестабильности станка в работе прибор не сможет обеспечить изготовление детали в пределах поля допуска. Измерительная информация о размере детали при активном контроле оценивается величиной поля допуска и вероятностью получения годной детали. Достоверность информации определяется по таблицам  $\Phi(z)$  при определенных значениях  $z$ . Величина

$$z = \frac{3\sigma - \delta_{\text{изд}}}{\sigma}$$
 (если центр группирования размеров деталей, получаемых на станке с участием прибора ак-



тивного контроля, совпадает с серединой поля допуска), а  $\sigma$ —среднее квадратичное рассеивание размеров,  $\delta_{\text{изд}}$ —половина величины допуска. Если центр группирования не совпадает с серединой поля допуска на величину  $\Delta$ ,  $\Phi(z) = \Phi(z_1) + \Phi(z_2)$ .

$$z_1 = \frac{3\sigma - \delta_{\text{изд}} + \Delta}{\sigma};$$

$$z_2 = \frac{3\sigma - \delta_{\text{изд}} - \Delta}{\sigma}.$$

## Глава 9. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

### 9.1. Показатели надежности настройки

Приборы для контроля линейных размеров с помощью концевых мер или образцовых деталей настраиваются на определенные значения размеров. При переходе действительных размеров деталей за установленные границы приборы выдают сигнал измерительной информации или управляющий импульс (приборы активного контроля), после чего контролер, или оператор, производит отбраковку деталей (брак+ или брак —) или заканчивает ее обработку (при использовании приборов активного контроля).

Точность контроля и измерения зависит от того, как соответствует действительный уровень настройки прибора заданному (установленному). Это соответствие определяется погрешностью операции настройки и смещением уровня настройки в процессе эксплуатации прибора. Погрешность операции настройки на заданный размер зависит от качества настроечного элемента прибора, принятого метода настройки (по концевым мерам или образцовым деталям) и квалификации настройщика. В процессе работы в результате неравномерного нагревания отдельных частей прибора, износа и загрязнения измерительных поверхностей, самопроизвольного смещения настроечных элементов и прочего происходит смещение уровня первоначальной настройки. Если этот уровень переходит допустимые значения, происходит отказ настройки.

Если по оси  $y$  (рис. 9.1) будем откладывать погрешность настройки всех однотипных приборов, а по оси  $x$  — время эксплуатации прибора (или количество циклов измерений), изменение уровня настройки каждого прибора можно описать случайной функцией  $y(t)$ , а смещение настройки всех однотипных приборов — случайным процессом с начальными характеристиками: математическим ожиданием  $x_{н_0}$  (средним

значением погрешности первоначальной настройки) и  $Dx_{H_0}$  — дисперсией погрешности первоначальной настройки, а также со следующими характеристиками процесса:  $Mx_H$  (математическим ожиданием случайного процесса) и  $Dx_H$  (дисперсией случайного процесса).

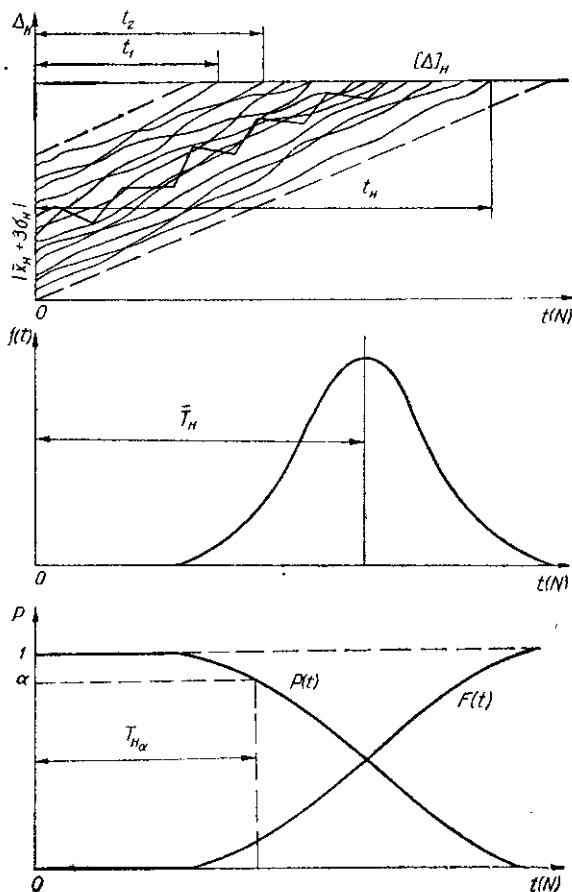


Рис. 9. 1. Показатели надежности настройки

Если  $[\Delta]_H$  — допустимое значение погрешности настройки, в момент времени  $t_i$  погрешность настройки  $i$ -го прибора превысит допустимое значение, т. е.

произойдет отказ прибора по настройке. Так как величина  $t_i$  — случайная величина, полной характеристикой рассеивания времени работы однотипных приборов до поднастройки служит функция распределения  $f(t)$ , вид которой зависит от закономерности смещения настройки. Кривая распределения  $f(t)$  дает возможность подсчитать средний срок работы однотипных приборов без надстроек  $\bar{T}_n$  (математическое ожидание), рассеивание (дисперсию) этих сроков относительно центра группирования и другие числовые параметры случайной величины  $t$ .

Для оценки надежности прибора по отказам настройки необходимо знать вероятность безотказной работы  $P(t)$  в пределах заданного периода времени  $t$  работы прибора без поднастройки. Для этого воспользуемся значением интегральной функции появления отказов по настройке  $F(t)$ . Вероятность безотказной работы  $P(t)$  относится к событию, противоположному появлению отказа  $F(t)$ . Поэтому

$$P(t) + F(t) = 1 \text{ или } P(t) = 1 - F(t).$$

Функция  $P(t)$  является зеркальным отображением функции  $F(t)$ , и ее ординаты характеризуют вероятность безотказной работы прибора за данный промежуток времени  $t$ . Зная кривую  $P(t)$ , можно, задаваясь допустимым значением  $P(t)$ , определить необходимый промежуток времени  $T_{на}$  между поднастройками прибора или, наоборот, при заданном  $T_{на}$  определить вероятность безотказной работы прибора без поднастройки.

Учитывая конкретные условия эксплуатации приборов, целесообразнее установить один показатель надежности, непосредственно определяющий порядок обслуживания приборов во время работы, а именно  $T_{на}$  — время непрерывной работы прибора (в часах, минутах или в числе работы циклов), после которого должна производиться проверка настройки прибора и поднастройка его на заданный уровень. Проверка настройки прибора осуществляется при помощи тех же конечных мер или образцовых деталей, по которым производилась первоначальная настройка приборов, и при обнаруживании смещения настройки производится поднастройка при помощи настроечных элементов прибора.

Показатели надежности настройки измерительных

головок с зубчатой рычажно-зубчатой, рычажно-оптической, пружинно-оптической передачами и измерительных преобразователей могут быть определены на стенде (рис. 9.2). Измерительному стержню 2 головки или преобразователя сообщается возвратно-поступательное движение от кулачка 3 через кронштейн 4, подвешенного на плоских пружинах 1. Снизу к кронштейну прикрепляется толкатель 5, который контактирует с клиновым устройством 6.

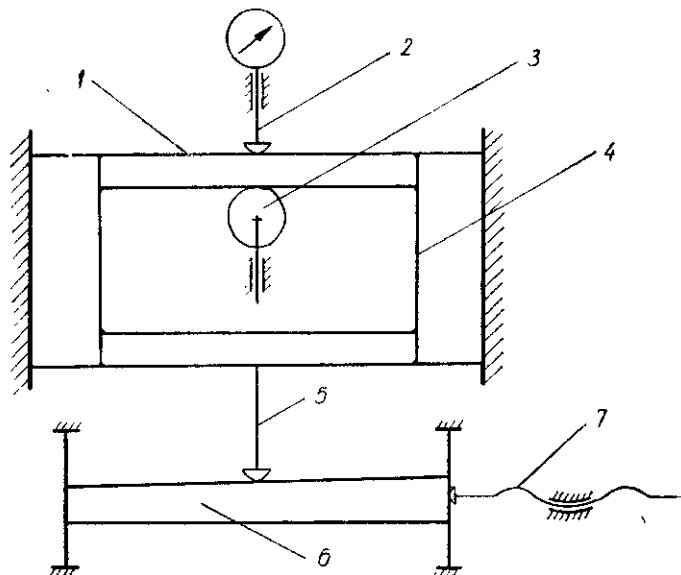


Рис. 9.2. Стенд для определения погрешностей настройки

вым устройством 6. Кулачок 3 опускается вниз до тех пор, пока измерительный наконечник 2 через толкатель 5 не соприкоснется с клиновым устройством 6. При помощи микровинта 7 клин перемещается влево до тех пор, пока стрелка показывающего устройства прибора не установится на нуле, при этом фиксируется показание на барабане микromетра (при установке на нуль показывающего прибора использовалась линза).

Затем клиновое устройство отводится вправо, кулачок поднимается вверх до соприкосновения с кронштейном и включается электродвигатель, сообщающий вращение кулачку. После определенного числа движений

измерительного наконечника, имитирующих измерение головками или преобразователями, двигатель отключается, кулачок опускается вниз, клин перемещается влево до тех пор, пока стрелка показывающего устройства снова установится на нуль. Величина смещения настройки определяется как разность показаний на барабане микрометра с учетом передаточного отношения клина ( $i \cdot 100$ ).

Показатели надежности настройки *приборов активного контроля* определяются на основании данных о размерах деталей, полученных непосредственно при обработке на станках с участием приборов активного контроля и замеренных на универсальных приборах. На рис. 9.3. построена точечная диаграмма получения

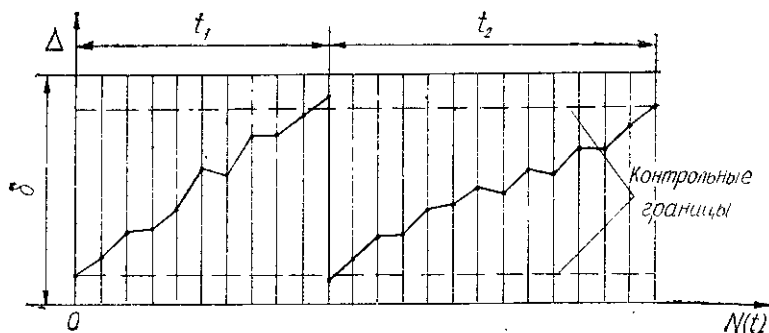


Рис. 9.3. Точечная диаграмма изменения размеров деталей при обработке на станках с участием приборов активного контроля

размеров деталей с участием приборов активного контроля. Как видно из диаграммы, размеры деталей постепенно изменяются и в какой-то момент  $t_1$  выходят за контрольные границы (в этот момент оператор обязан производить поднастройку прибора). Изменение размеров деталей происходит в результате износа измерительных наконечников (для приборов активного контроля, контролирующих детали в процессе обработки, причем износ является существенной величиной); в результате изменения давления в сети — для пневматических приборов; в результате износа контактов — для электроконтактных приборов; в результате изменения напряжения на фотоэлемент и изменения яркости ис-

точника—для фотоэлектрических приборов и т. д. После поднастройки прибора команда о прекращении обработки детали будет подаваться раньше или позже в зависимости от того, будут ли увеличиваться или уменьшаться размеры в результате смещения настройки прибора.

Проведенные исследования по определению показателей надежности настройки приборов активного контроля установили, что гарантированное время между поднастройками для различных приборов значительно отличается, и если для «Cumat» прибора с вероятностью 0,9 можно обрабатывать 11 деталей, для прибора «Yvail-200»—40 деталей (табл. 9. 1).

Табл. 9. 1. Сравнение показателей надежности приборов активного контроля

Наименование прибора активного контроля	Диаметр обрабатываемой детали $\Phi$ , мм	Допуск на размер обрабатываемой детали $\delta$ , мкм	Среднее число деталей, обрабатываемых на станке без подналадки, $T_H$	Среднее квадратическое рассеивание количества деталей, обрабатываемых на станке без подналадки, $\sigma_H$	Гарантированное количество деталей, обрабатываемых на станке без подналадки, $T_{гд}$
Индуктивный прибор АК на станке 6С60	28	25	32	17,35	30
Индуктивный прибор АК на станке 6С60	39	25	29	13,1	26
Индуктивный прибор АК «Nova»	40	25	34	19,9	32
П — 35 М на станке ЛЗ-204	35	12	26	14	24
«Cumat»	35	12	11	6,6	10
«Siog-50»	20	10	12	6,9	11
«Yvail-200»	33	20	40	12	38

## 9. 2. Показатели надежности при грубых ошибках контроля

Для приборов производственного контроля [17], особенно для автоматических приборов, характерен особый вид отказов, который заключается в том, что в каком-то одном рабочем цикле происходит грубая ошибка (при сортировке деталь направляется в группу «брак—» вмес-

то группы «брак+» или прибор выдает сигнал на подналадку, несмотря на то, что для этого нет никаких оснований). В следующих циклах прибор продолжает нормально работать. Обычно такой отказ вызывается сбоем в работе какого-либо блока прибора, чаще всего — электроавтоматики. Так как каждый отказ такого типа приводит к браку продукции или неправильной сортировке ее, экономическое значение этих отказов велико и их нельзя не учитывать.

Грубые ошибки контроля представляют собой типичные внезапные отказы и для них, как правило, справедлив экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы. Следовательно, их можно охарактеризовать одним параметром потока  $\lambda_{гр}$  отказов такого типа, который равен вероятности того, что в очередном рабочем цикле произойдет грубая ошибка контроля.

### 9.3. Показатели ремонтпригодности за короткое время эксплуатации прибора

Важное требование к надежности прибора — простота и удобство текущего обслуживания — должно рассматриваться с двух точек зрения. Во-первых, важно, чтобы операции по текущему обслуживанию были возможно менее длительными и тем самым действительная производительность мало отличалась от теоретической. Во-вторых, нужна малая трудоемкость обслуживания, что определяется, кроме времени, еще числом и квалификацией обслуживающих прибор операторов. С этой точки зрения надежность прибора можно охарактеризовать средним значением коэффициента технического использования прибора за смену  $K_{ис}$ .

Коэффициент технического использования вычисляется по формуле

$$K_{ис} = \frac{1}{1 + \frac{t_{п}}{t_p}}$$

где  $t_{п}$  — общее время простоя прибора за смену для устранения отказов и для проведения профилактических мероприятий, предназначенных для повышения его работоспособности и



предусмотренных правилами эксплуатации (в том числе плановой проверки настройки и поднастройки);

$t_p$  — общее время нормальной работы прибора в течение смены.

Во время  $t_{п}$  не должны включаться операции, не имеющие отношения к надежности прибора, например засыпка бункера контрольного автомата деталями или переналадка прибора на другую контрольную операцию.

Показатели надежности приборов за короткое время (несколько часов или смен) отличаются тем, что они могут быть определены для каждого экземпляра из партии приборов, а не выборочно. Это объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, отказы настройки или грубые ошибки контроля, которые учитываются при определении соответствующих показателей, полностью устраняются, и свойства приборов после восстановления ничем не отличаются от их свойств до отказа. Поэтому имеется возможность многократно испытывать один и тот же прибор, получая достаточное количество данных для достоверной оценки показателей надежности, в то же время не уменьшая практически технический ресурс прибора. Во-вторых, время, необходимое для проведения испытаний и определения величины показателей надежности, сравнительно невелико, так что эти испытания могут быть включены в состав приемочных испытаний нового прибора. Эти особенности существенны для сложных приборов, которые выпускаются малыми сериями или в одном-двух экземплярах.

#### 9.4. Показатели точностной надежности

**Общие сведения.** Важнейшими показателями надежности контрольно-измерительных приборов являются показатели точностной надежности, т. е. способность приборов в течение длительного времени эксплуатации (без ремонта) обеспечивать требуемую точность контроля. В данном случае целесообразно применить показатели, непосредственно отражающие особенности условий эксплуатации приборов.

Метрологическая служба страны состоит из трех основных звеньев: метрологических институтов, лабораторий государственного надзора за стандартами и изме-

рительной техникой (ЛГН) и ведомственных метрологических служб предприятий. Все три звена метрологической службы находятся в тесной взаимной связи: метрологические институты контролируют состояние образцовых средств измерений ЛГН. ЛГН осуществляет контроль за исходными средствами измерений лабораторий ведомственного надзора, а последние отвечают за состояние рабочих средств измерений, эксплуатируемых на предприятиях. Таким образом метрологические институты и ЛГН, с одной стороны, и ведомственные метрологические службы министерств, ведомств и предприятий, с другой, осуществляют государственный и ведомственный надзор за состоянием измерительной техники в целом по стране. При этом одной из важнейших форм такого надзора является периодическая поверка средств измерений.

До 1972 г. действовали «Правила 12-58 организации и проведения поверки мер и измерительных приборов и контроля за состоянием измерительной техники», в которых указаны максимальные межповерочные интервалы для обширного круга приборов. Они не учитывают интенсивность использования, условия работы и особенности приборов, образующих группу, для которых установлен единый межповерочный интервал. В результате приборы с высокой временной стабильностью поверяются чрезмерно часто, что увеличивает стоимость поверочных работ и неоправданное транспортирование приборов. Поверка в те же сроки приборов с низкой стабильностью приводит к использованию средств измерений, не удовлетворяющих установленным требованиям к моменту очередной поверки.

С 1 января 1972 г. «Правила 12-58» были заменены ГОСТ 8002—71, в котором указывается, что периодичность поверки средств измерений должна устанавливаться в зависимости от условий их эксплуатации. В приложении к стандарту дан перечень образцовых средств измерений, подлежащих периодической поверке, и предельные ее сроки. Государственным и ведомственным метрологическим службам дано право устанавливать межповерочные интервалы для конкретных типов средств измерений исходя из условий работы приборов, их стабильности, сроков службы и т. д.

В настоящее время известны следующие методы

установления и корректировки межповерочных интервалов  $T_n$  : в зависимости от интенсивности использования приборов; на основе доли приборов, забракованных при поверке; на основе данных о продолжительности безотказной работы измерительной аппаратуры; на основе обработки статистических данных длительного наблюдения за приборами; на основе взаимных сличений однотипных средств измерений в целях определения их состояния внутри межповерочного интервала.

**Метод установления межповерочного интервала в зависимости от интенсивности использования приборов.** Этот метод требует отказа от календарных сроков поверок и перехода к графику поверок, основанных на

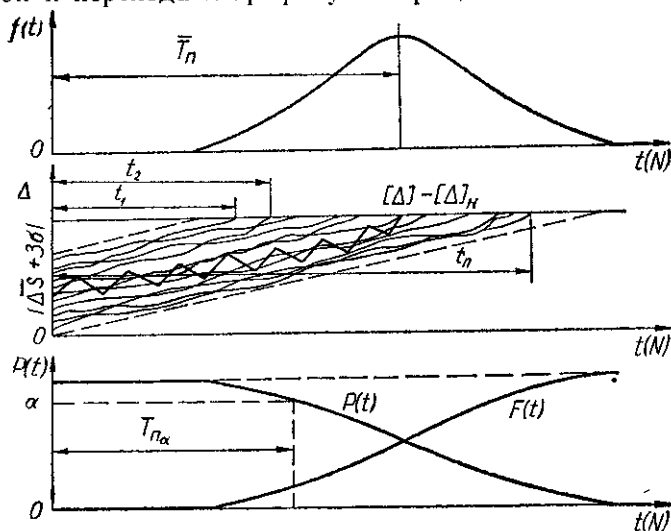


Рис. 9. 4. Показатели точностной надежности

практическом времени использования приборов. Преимущество такого метода состоит в том, что часто используемые приборы обслуживаются лучше, чем редко применяемые. При использовании этого метода необходимо предварительно определять зависимость погрешности измерительного прибора от времени эксплуатации. Если по оси  $Y$  откладывать погрешность прибора в момент поверки, а по оси  $X$  — время эксплуатации прибора,  $t_i$  — является моментом, когда погрешность прибора превысит допустимую величину (рис. 9. 4).

Промежуток времени  $t_i$  до проведения ремонта (если погрешность прибора превышает допустимую величину, необходимо его отремонтировать и юстировать) является величиной случайной. Поэтому при оценке основного показателя точностной надежности  $T_n$  необходимо основываться на теории вероятности и математической статистики, а величина вероятности безотказной работы  $P(t)$  за межповерочный интервал  $T_{п\alpha}$ , с которой выбирается межповерочный интервал, должна назначаться на основе технико-экономических расчетов с учетом затрат, связанных с поверкой прибора, с одной стороны, и возможных потерь от использования недостаточно точного прибора — с другой. К недостаткам этого метода следует отнести необходимость проведения предварительных исследований по стабильности средств измерений.

**Метод проб на основе доли приборов, забракованных при поверке.** При использовании этого метода первоначальный межповерочный интервал выбирается на основе опыта эксплуатации приборов и заданного уровня надежности. Затем интервал увеличивается или уменьшается в зависимости от доли приборов, забракованных при поверке. В соответствии с потребностями производства устанавливают определенный уровень надежности средств измерений по вероятности безотказной работы за межповерочный интервал. Для образцовых приборов высших разрядов выбирают уровень надежности, как правило, порядка 0,95; для образцовых приборов низших разрядов — 0,90; для рабочих приборов — 0,80 — 0,85. Первоначально выбранный интервал корректируется после каждой поверки в соответствии с ее результатами. В зависимости от того, оказался прибор при очередной поверке в допустимых пределах или нет, интервал либо увеличивается, либо уменьшают, доводя уровень надежности приборов до заданной величины.

Основной недостаток метода состоит в том, что он не дает полного представления о состоянии прибора внутри межповерочного интервала и характеризует состояние прибора только в момент его поверки. Приборы могут быть исправными в течение продолжительного времени внутри межповерочного интервала и, следовательно, доля неверных измерений за межповерочный

интервал, выполненная этими приборами, будет меньше, чем доля приборов, забракованных при поверке.

Установление научно обоснованных межповерочных интервалов для различных групп измерительных приборов требует накопления и обработки большого объема статистических данных, что возможно только на базе автоматизированных систем сбора и обработки результатов поверки средств измерений.

В связи с этим при разработке методов установления переменных межповерочных интервалов параллельно решают и вопросы создания соответствующих автоматизированных информационных систем. В этих системах результаты каждой поверки и все необходимые данные о поверяемом приборе (дата поверки, номер прибора и т. д.) записываются на бланках и передаются для записи на магнитную ленту. Результаты записей обрабатываются, сводятся в отчет по анализу интервалов поверки и классифицируются по лабораториям, выполняющим поверку, предприятиям-изготовителям приборов, по причинам поступления на поверку. Для каждой из этих категорий обобщаются данные о числе выполненных поверок; количестве приборов, в которых обнаружены отклонения от допуска; количестве приборов, требующих регулировки или ремонта. Отчет изучается и определяется правильность выбранных межповерочных интервалов.

Более полно и всесторонне анализировать данные результатов поверок можно с помощью электронных вычислительных машин. В настоящее время уже создана автоматизированная информационно-управляющая система (АИУС) Госстандарта СССР, в рамках которой будет разработана АИУС метрологии.

### **9. 5. Показатели надежности приборов при отказах функционирования**

Отказ функционирования прибора заключается в том, что прибор перестает выполнять одну из своих основных функций, например выдавать импульс для открывания заслонки, направляющей бракованные детали «брак—», или подавать детали из бункера на измерительную позицию и т. д.

Непосредственными причинами отказов функцио-

рования являются, как правило, механическое повреждение деталей прибора из-за неправильных методов эксплуатации, заклинивание (заедание) какой-то детали механизма, механическое или электрическое повреждение элементов электросхемы, проявление технологических дефектов. Выход прибора из строя при этом происходит внезапно, без предшествующих симптомов разрушения и не зависит от длительности работы прибора.

Поток внезапных отказов приборов можно охарактеризовать интенсивностью отказов  $\lambda_{пр}$ , при этом время работы от момента окончания восстановления его после предыдущего отказа и до появления нового отказа подчиняется, как показали исследования, экспоненциальному закону распределения.

Вероятность безотказной работы в интервале времени  $[T_0; T_0 + T_n]$  при условии, что в момент  $T_0$  прибор был исправлен, вычисляется по формуле

$$P_{T_n} = e^{-\lambda_{пр} T_n}.$$

Следовательно, зная вероятность безотказной работы приборов за межповерочный интервал  $P_{T_n}$  и зная число одинаковых приборов на заводе  $N$ , можно определить количество приборов, которые выйдут из строя из-за поломок в период между поверками, что в свою очередь дает возможность подсчитать число запасных приборов или запасных частей приборов  $\lambda_{пр} = \sum \lambda_i$ , где  $\lambda_i$  интенсивность отказов  $i$ -го элемента прибора, необходимых для обеспечения непрерывности технологического процесса выпуска готовой продукции.

### 9.6. Показатели ремонтпригодности за длительный период эксплуатации приборов

Целесообразно нормировать потери времени вследствие ненадежности прибора, т. е. время, идущее на устранение отказов и на их профилактику. С этой целью нужно ввести коэффициент технического использования прибора за длительное время эксплуатации  $K_{н./д}$  [17], вычисляемой по формуле

$$K_{н./д} = \frac{1}{1 + \frac{t_{рем}}{t_{раб}} + \frac{t_{пов}}{T_n}}.$$

где  $t_{\text{рем}}$  — общее время, затраченное на ремонт прибора за тот же период (включая ремонт, проведенный по результатам периодических проверок, и время на испытания прибора после ремонта);

$t_{\text{раб}}$  — общее время работы прибора в течение определенного периода эксплуатации (год или более), включая переналадки, настройки и другие операции текущего обслуживания;

$t_{\text{пов}}$  — плановое время на одну периодическую проверку прибора;

$T_n$  — расчетное время работы прибора между поверками.

Фонд времени на проведение ремонтных и регулировочных работ определяется по формуле

$$t_{\text{рем}} = \sum_{i=1}^N t_{\text{рем}i},$$

где  $N$  — число видов средств, ремонт и регулировку которых планируется производить;

$t_{\text{рем}i}$  — фонд времени на проведение ремонтных и регулировочных работ  $i$ -го вида (значение  $t_{\text{рем}i}$  определяется по среднегодовым данным «Типового положения о метрологической службе предприятия»).

Требуемое число ремонтников  $K_{\text{рем}}$  определяется по формуле

$$K_{\text{рем}} = \sum_{i=1}^N \frac{t_{\text{рем}i}}{t_p},$$

где  $t_p$  — фонд времени одного ремонтника, используемого непосредственно на выполнение ремонтных работ, при первоначальном расчете  $t_p$  принимается 1400 ÷ 1500 ч и в дальнейшем уточняется путем более точного учета всех непроизводительных затрат на очередные отпуска, дополнительные отпуска учащихся, болезни и др.

### 9.7. Экономические показатели надежности измерительных приборов

Одним из важнейших показателей является экономический показатель надежности, характеризующий затраты на эксплуатацию приборов, связанных с его нена-

дежностью. К ним относятся затраты на ремонт, включая стоимость запасных частей; на проведение периодических проверок, на смазку, чистку и другие операции технического обслуживания, предназначенные для поддержания прибора в работоспособном состоянии, на поверку настройки и подстройки прибора в процессе эксплуатации.

К числу этих затрат следует также отнести стоимость изготовленных деталей, оказавшихся бракованными из-за отказа прибора активного контроля; стоимость перепроверки деталей, контроль которых выполнялся неисправным прибором; стоимость прибора, заменяющего основной прибор на время его ремонта и т. п.

Для характеристики приборов с этой точки зрения целесообразно выбрать коэффициент  $K_3$ , который определяется по следующей формуле:

$$K_3 = 1 - \frac{C_n}{C_{\text{общ}}} = \frac{\bar{C}_n}{C_{\text{общ}}},$$

где  $C_n$  — затраты на эксплуатацию в течение года и более, вызванные ненадежностью прибора;

$C_{\text{общ}}$  — общая сумма затрат на эксплуатацию прибора за длительное время (год и более);

$\bar{C}_n = C_{\text{общ}} - C_n$  — затраты на эксплуатацию прибора, не связанные с его ненадежностью.

К затратам  $\bar{C}_n$ , не связанным с ненадежностью прибора, должны быть отнесены затраты на проведение таких операций текущего обслуживания, как наладка прибора на новую контролируемую деталь или размер, загрузка и разгрузка бункеров или установка и съем контролируемой детали и т. д. Сюда же относятся затраты на питание прибора (электроэнергию, сжатый воздух, на изготовление настроечных эталонов и т. п.).

Следует полагать, что при анализе затрат, входящих в общую сумму  $C_{\text{общ}}$ , будет легче выделять затраты  $\bar{C}_n$ , чем  $C_n$ .

Необходимо иметь в виду, что показатель  $K_3$  отнюдь не исчерпывает всех экономических аспектов проблемы надежности, так как учитывает лишь затраты на эксплуатацию прибора, а не экономический эффект в народном хозяйстве от его применения.



## 9. 8. Показатели сохраняемости приборов

Сохраняемость приборов целесообразно характеризовать величиной относительной потери качества вследствие транспортировки и хранения.

Если для данного типа приборов установлен общий показатель качества  $Q_{\text{общ}}$ , дающий обобщающую характеристику качества прибора, коэффициент сохраняемости  $K_c$  может быть рассчитан по формуле

$$K_c = \frac{Q'_{\text{общ}} - (Q_{\text{общ}})_{\text{доп}}}{Q^0_{\text{общ}} - (Q_{\text{общ}})_{\text{доп}}},$$

где  $Q'_{\text{общ}}$  — общий показатель качества прибора после транспортировки и хранения;

$(Q_{\text{общ}})_{\text{доп}}$  — наименьшее допустимое по ТУ значение общего показателя качества;

$Q^0_{\text{общ}}$  — общий показатель качества прибора до его транспортировки и хранения.

Если качество прибора характеризуется не одним показателем, а комплексом независимых показателей  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ , формула должна быть заменена следующей:

$$K_c = \frac{Q'_1 - Q_{1\text{доп}}}{Q^0_1 - Q_{1\text{доп}}} \cdot \frac{Q'_2 - Q_{2\text{доп}}}{Q^0_2 - Q_{2\text{доп}}} \cdot \dots \cdot \frac{Q'_n - Q_{n\text{доп}}}{Q^0_n - Q_{n\text{доп}}},$$

где обозначения соответствуют выше приведенным.

Для приборов контроля важнейшими показателями качества являются показатели точности, в том числе показатели надежности за короткое время эксплуатации  $T_n$  и  $\lambda_{гр}$ .

## 9. 9. Показатели долговечности приборов

Долговечность приборов характеризуется их техническим ресурсом  $R$  — общим объемом или временем работы, выполненным прибором за весь срок его службы до момента, когда дальнейшая эксплуатация невозможна или экономически нецелесообразна.

Показателем долговечности следует считать гарантированный ресурс  $R(\alpha)$  — ресурс, которым обладают  $\alpha \cdot 100\%$  приборов из данной партии.

Необходимо иметь в виду, что гарантийный срок службы прибора, т. е. срок, в течение которого изготовитель несет ответственность за возникшие неисправности, не является показателем надежности. Гарантийный срок — юридическое понятие, которое само по себе не характеризует качества изделия. Только в том случае, если гарантийный срок устанавливается на основе правильного технико-экономического расчета с учетом реальной надежности изделия, можно считать, что увеличение гарантийного срока при неизменной сумме затрат на гарантийный ремонт отражает повышение надежности прибора.

1. Значение функции Лапласа  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$

$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$
1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0,00	0,0000	0,21	0,0832	0,42	0,1628	0,63	0,2357	0,84	0,2995	1,05	0,3531	1,26	0,3962
0,01	0,0040	0,22	0,0871	0,43	0,1664	0,64	0,2389	0,85	0,3023	1,06	0,3554	1,27	0,3980
0,02	0,0080	0,23	0,0910	0,44	0,1700	0,65	0,2422	0,86	0,3051	1,07	0,3577	1,28	0,3997
0,03	0,0120	0,24	0,0948	0,45	0,1736	0,66	0,2454	0,87	0,3078	1,08	0,3599	1,29	0,4015
0,04	0,0160	0,25	0,0987	0,46	0,1772	0,67	0,2486	0,88	0,3106	1,09	0,3621	1,30	0,4032
0,05	0,0199	0,26	0,1026	0,47	0,1808	0,68	0,2517	0,89	0,3133	1,10	0,3643	1,31	0,4049
0,06	0,0239	0,27	0,1064	0,48	0,1844	0,69	0,2549	0,90	0,3159	1,11	0,3665	1,32	0,4066
0,07	0,0279	0,28	0,1103	0,49	0,1879	0,70	0,2580	0,91	0,3186	1,12	0,3686	1,33	0,4082
0,08	0,0319	0,29	0,1141	0,50	0,1915	0,71	0,2611	0,92	0,3212	1,13	0,3708	1,34	0,4099
0,09	0,0359	0,30	0,1179	0,51	0,1950	0,72	0,2642	0,93	0,3238	1,14	0,3729	1,35	0,4115
0,10	0,0398	0,31	0,1217	0,52	0,1985	0,73	0,2673	0,94	0,3264	1,15	0,3749	1,36	0,4131
0,11	0,0438	0,32	0,1255	0,53	0,2019	0,74	0,2703	0,95	0,3289	1,16	0,3770	1,37	0,4147
0,12	0,0478	0,33	0,1293	0,54	0,2054	0,75	0,2734	0,96	0,3315	1,17	0,3790	1,38	0,4162
0,13	0,0517	0,34	0,1331	0,55	0,2088	0,76	0,2764	0,97	0,3340	1,18	0,3810	1,39	0,4177
0,14	0,0557	0,35	0,1368	0,56	0,2123	0,77	0,2794	0,98	0,3365	1,19	0,3830	1,40	0,4192
0,15	0,0596	0,36	0,1406	0,57	0,2157	0,78	0,2823	0,99	0,3389	1,20	0,3849	1,41	0,4207
0,16	0,0636	0,37	0,1443	0,58	0,2190	0,79	0,2852	1,00	0,3413	1,21	0,3869	1,42	0,4222
0,17	0,0675	0,38	0,1480	0,59	0,2224	0,80	0,2881	1,01	0,3438	1,22	0,3888	1,43	0,4236
0,18	0,0714	0,39	0,1517	0,60	0,2257	0,81	0,2910	1,02	0,3461	1,23	0,3907	1,44	0,4251
0,19	0,0753	0,40	0,1554	0,61	0,2291	0,82	0,2939	1,03	0,3485	1,24	0,3925	1,45	0,4265
0,20	0,0793	0,41	0,1591	0,62	0,2324	0,83	0,2967	1,04	0,3508	1,25	0,3944	1,46	0,4279

Продолжение

1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1,47	0,4292	1,63	0,4484	1,79	0,4633	1,95	0,4744	2,22	0,4868	2,54	0,4945	2,86	0,4979
1,48	0,4306	1,64	0,4495	1,80	0,4641	1,96	0,4750	2,24	0,4875	2,56	0,4948	2,88	0,4980
1,49	0,4319	1,65	0,4505	1,81	0,4649	1,97	0,4756	2,26	0,4881	2,58	0,4951	2,90	0,4981
1,50	0,4332	1,66	0,4515	1,82	0,4656	1,98	0,4761	2,28	0,4887	2,60	0,4953	2,92	0,4982
1,51	0,4345	1,67	0,4525	1,83	0,4664	1,99	0,4767	2,30	0,4893	2,62	0,4956	2,94	0,4984
1,52	0,4357	1,68	0,4535	1,84	0,4671	2,00	0,4772	2,32	0,4898	2,64	0,4959	2,96	0,49846
1,53	0,4370	1,69	0,4545	1,85	0,4678	2,02	0,4783	2,34	0,4904	2,66	0,4961	2,98	0,49856
1,54	0,4382	1,70	0,4554	1,86	0,4686	2,04	0,4793	2,36	0,4909	2,68	0,4963	3,00	0,49865
1,55	0,4394	1,71	0,4564	1,87	0,4693	2,06	0,4803	2,38	0,4913	2,70	0,4965	3,20	0,49931
1,56	0,4406	1,72	0,4573	1,88	0,4699	2,08	0,4812	2,40	0,4918	2,72	0,4967	3,40	0,49966
1,57	0,4418	1,73	0,4582	1,89	0,4706	2,10	0,4821	2,42	0,4922	2,74	0,4969	3,60	0,49984
1,58	0,4429	1,74	0,4591	1,90	0,4713	2,12	0,4830	2,44	0,4927	2,76	0,4971	3,80	0,499928
1,59	0,4441	1,75	0,4599	1,91	0,4719	2,14	0,4838	2,46	0,4931	2,78	0,4973	4,00	0,499968
1,60	0,4452	1,76	0,4608	1,92	0,4726	2,16	0,4846	2,48	0,4934	2,80	0,4974	5,00	0,499997
1,61	0,4463	1,77	0,4616	1,93	0,4732	2,18	0,4854	2,50	0,4938	2,82	0,4976		
1,62	0,4474	1,78	0,4625	1,94	0,4738	2,20	0,4861	2,52	0,4941	2,84	0,4977		

2. Квантили распределения Стьюдента  $t_{1-\frac{p}{2}}$

Число степеней свободы $f$	Уровень значимости $p$						
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001
1	2	3	4	5	6	7	8
1	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66	127,32	636,62
2	1,89	2,92	4,30	6,97	9,93	14,09	31,60
3	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84	7,45	12,94
4	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60	5,60	8,61
5	1,48	2,02	2,57	3,37	4,03	4,77	6,86
6	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71	4,32	5,96
7	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50	4,03	5,41
8	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36	3,83	5,04
9	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25	3,69	4,78
10	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17	3,58	4,59
11	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11	3,50	4,44
12	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06	3,43	4,32
13	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01	3,37	4,22
14	1,34	1,76	2,15	2,62	2,98	3,33	4,14
15	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95	3,29	4,07
16	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92	3,25	4,02
17	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90	3,22	3,97
18	1,33	1,73	2,10	2,55	2,88	3,20	3,92
19	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86	3,17	3,88
20	1,33	1,73	2,09	2,53	2,85	3,15	3,85
21	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83	3,14	3,82
22	1,32	1,72	2,07	2,51	2,82	3,12	3,79
23	1,32	1,71	2,07	2,50	2,81	3,10	3,77
24	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80	3,09	3,75
25	1,32	1,71	2,06	2,48	2,79	3,08	3,73
26	1,32	1,71	2,06	2,48	2,78	3,07	3,71
27	1,31	1,70	2,05	2,47	2,77	3,06	3,69
28	1,31	1,70	2,05	2,47	2,76	3,05	3,67
29	1,31	1,70	2,04	2,46	2,76	3,04	3,66
30	1,31	1,70	2,04	2,46	2,75	3,03	3,65
40	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70	2,97	3,55
60	1,30	1,67	2,00	2,39	2,66	2,91	3,46
120	1,29	1,66	1,98	2,36	2,62	2,86	3,37
$\infty$	1,28	1,64	1,96	2,33	2,58	2,81	3,29

3. Квантили распределения Пирсона  $\chi^2_{1-p}$ 

Число степеней свободы $f$	Уровень значимости $p$					
	0,99	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50
1	2	3	4	5	6	7
1	0,00016	0,0039	0,016	0,064	0,148	0,455
2	0,020	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386
3	0,115	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366
4	0,30	0,71	1,06	1,65	2,19	3,36
5	0,55	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35
6	0,87	1,63	2,20	3,07	3,83	5,35
7	1,24	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35
8	1,65	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34
9	2,09	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34
10	2,56	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34
11	3,1	4,6	5,6	7,0	8,1	10,3
12	3,6	5,2	6,3	7,8	9,0	11,3
13	4,1	5,9	7,0	8,6	9,9	12,3
14	4,7	6,6	7,8	9,5	10,8	13,3
15	5,2	7,3	8,5	10,3	11,7	14,3
16	5,8	8,0	9,3	11,2	12,6	15,3
17	6,4	8,7	10,1	12,0	13,5	16,3
18	7,0	9,4	10,9	12,9	14,4	17,3
19	7,6	10,1	11,7	13,7	15,4	18,3
20	8,3	10,9	12,4	14,6	16,3	19,3
21	8,9	11,6	13,2	15,4	17,2	20,3
22	9,5	12,3	14,0	16,3	18,1	21,3
23	10,2	13,1	14,8	17,2	19,0	22,3
24	10,9	13,8	15,7	18,1	19,9	23,3
25	11,5	14,6	16,5	18,9	20,9	24,3
26	12,2	15,4	17,3	19,8	21,8	25,3
27	12,9	16,2	18,1	20,7	22,7	26,3
28	13,6	16,9	18,9	21,6	23,6	27,3
29	14,3	17,7	19,8	22,4	24,6	28,3
30	15,0	18,5	20,6	23,4	25,5	29,3
31	15,7	19,3	21,4	24,3	26,4	30,3
32	16,4	20,1	22,3	25,1	27,4	31,3
33	17,1	20,9	23,1	26,0	28,3	32,3
34	17,8	21,7	24,0	26,9	29,2	33,3
35	18,5	22,5	24,8	27,8	30,2	34,3
36	19,2	23,3	25,6	28,7	31,1	35,3
37	20,0	24,1	26,5	29,6	32,1	36,3
38	20,7	24,9	27,3	30,5	33,0	37,3
39	21,4	25,7	28,2	31,4	33,9	38,3
40	22,2	26,5	29,1	32,3	34,9	39,3
41	22,9	27,3	29,9	33,3	35,8	40,3
42	23,7	28,1	30,8	34,2	36,8	41,3
43	24,4	29,0	31,6	35,1	37,7	42,3

1	2	3	4	5	6	7
44	25,1	29,8	32,5	36,0	38,6	43,3
45	25,9	30,6	33,4	36,9	39,6	44,3
46	26,7	31,4	34,2	37,8	40,5	45,3
47	27,4	32,3	35,1	38,7	41,5	46,3
48	28,2	33,1	35,9	39,6	42,4	47,3
49	28,9	33,9	36,8	40,5	43,4	48,3
50	29,7	34,8	37,7	41,4	44,3	49,3
51	30,5	35,6	38,6	42,4	45,3	50,3
52	31,2	36,4	39,4	43,3	46,2	51,3
53	32,0	37,3	40,3	44,2	47,2	52,3
54	32,8	38,1	41,2	45,1	48,1	53,3
55	33,6	39,0	42,1	46,0	49,1	54,3
56	34,4	39,8	42,9	47,0	50,0	55,3
57	35,1	40,6	43,8	47,9	51,0	56,3
58	35,9	41,5	44,7	48,8	51,9	57,3
59	36,7	42,3	45,6	49,7	52,9	58,3
60	37,5	43,2	46,5	50,6	53,8	59,3
61	38,3	44,0	47,3	51,6	54,8	60,3
62	39,1	44,9	48,2	52,5	55,7	61,3
63	39,9	45,7	49,1	53,4	56,7	62,3
64	40,7	46,6	50,0	54,3	57,6	63,3
65	41,4	47,5	50,9	55,3	58,6	64,3
66	42,2	48,3	51,8	56,2	59,5	65,3
67	43,0	49,2	52,7	57,1	60,5	66,3
68	43,8	50,0	53,5	58,0	61,4	67,3
69	44,6	50,9	54,4	59,0	62,4	68,3
70	45,4	51,7	55,3	59,9	63,3	69,3
71	46,2	52,6	56,2	60,8	64,3	70,3
72	47,0	53,4	57,1	61,8	65,3	71,3
73	47,9	54,3	58,0	62,7	66,2	72,3
74	48,7	55,2	58,9	63,6	67,2	73,3
75	49,4	56,0	59,8	64,5	68,1	74,3
76	50,3	56,9	60,7	65,5	69,1	75,3
77	51,1	57,8	61,6	66,4	70,0	76,3
78	51,9	58,7	62,5	67,3	71,0	77,3
79	52,7	59,5	63,4	68,3	72,0	78,3
80	53,5	60,4	64,3	69,2	72,9	79,3

#### 4. Квантили распределения Пирсона $\chi^2_{1-\rho}$

Число степеней свободы $f$	Уровень значимости $\rho$					
	0,20	0,10	0,05	0,01	0,005	0,001
1	2	3	4	5	6	7
1	1,64	2,7	3,8	6,6	7,9	10,8
2	3,22	4,6	6,0	9,2	10,6	13,8
3	4,64	6,3	7,8	11,3	12,8	16,3
4	6,0	7,8	9,5	13,3	14,9	18,5
5	7,3	9,2	11,1	15,1	16,3	20,5
6	8,6	10,6	12,6	16,8	18,6	22,5
7	9,8	12,0	14,1	18,5	20,3	24,3
8	11,0	13,4	15,5	20,1	21,9	26,1
9	12,2	14,7	16,9	21,7	23,6	27,9
10	13,4	16,0	18,3	23,2	25,2	29,6
11	14,6	17,3	19,7	24,7	26,8	31,3
12	15,8	18,5	21,0	26,2	28,3	32,9
13	17,0	19,8	22,4	27,7	29,8	34,5
14	18,2	21,1	23,7	29,1	31,3	36,1
15	19,3	22,3	25,0	30,6	32,8	37,7
16	20,5	23,5	26,3	32,0	34,3	39,2
17	21,6	24,8	27,6	33,4	35,7	40,8
18	22,8	26,0	28,9	34,8	37,2	42,3
19	23,9	27,2	30,1	36,2	38,6	43,8
20	25,0	28,4	31,4	37,6	40,0	45,3
21	26,2	29,6	32,7	38,9	41,4	46,8
22	27,3	30,8	33,9	40,3	42,8	48,3
23	28,4	32,0	35,2	41,6	44,2	49,7
24	29,6	33,2	36,4	43,0	45,6	51,2
25	30,7	34,4	37,7	44,3	46,9	52,6
26	31,8	35,6	38,9	45,6	48,3	54,1
27	32,9	36,7	40,1	47,0	49,6	55,5
28	34,0	37,9	41,3	48,3	51,0	56,9
29	35,1	39,1	42,6	49,6	52,3	58,3
30	36,3	40,3	43,8	50,9	53,7	59,7
31	37,4	41,4	45,0	52,2	55,0	61,1
32	38,7	42,6	46,2	53,5	56,3	62,5
33	39,6	43,7	47,4	54,8	57,6	63,9
34	40,7	44,9	48,6	56,1	59,0	65,2
35	41,8	46,1	49,8	57,3	60,3	66,6
36	42,9	47,2	51,0	58,6	61,6	68,0
37	44,0	48,4	52,2	59,9	62,9	69,3
38	45,1	49,5	53,4	61,2	64,2	70,7
39	46,2	50,7	54,6	62,4	65,5	72,1
40	47,3	51,8	55,8	63,7	66,8	73,4
41	48,4	53,0	56,9	65,0	68,1	74,7
42	49,5	54,1	58,1	66,2	69,3	76,1
43	50,5	55,2	59,3	67,5	70,6	77,4



## Продолжение

1	2	3	4	5	6	7
44	51,6	56,4	60,5	68,7	71,9	78,7
45	52,7	57,5	61,7	70,0	73,2	80,1
46	53,8	58,6	62,8	71,2	74,4	81,4
47	54,9	59,8	64,0	72,4	75,7	82,7
48	56,0	60,9	65,2	73,7	77,0	84,0
49	57,1	62,0	66,3	74,9	78,2	85,4
50	58,2	63,2	67,5	76,2	79,5	86,7
51	59,2	64,3	68,7	77,4	80,7	88,0
52	60,3	65,4	69,8	78,6	82,0	89,3
53	61,4	66,5	71,0	79,8	83,3	90,6
54	62,5	67,7	72,2	81,1	84,5	91,9
55	63,6	68,8	73,3	82,3	85,7	93,2
56	64,7	69,9	74,5	83,5	87,0	94,5
57	65,8	71,0	75,6	84,7	88,2	95,8
58	66,8	72,2	76,8	86,0	89,5	97,0
59	67,9	73,3	77,9	87,2	90,7	98,3
60	69,0	74,4	79,1	88,4	91,6	99,6
61	70,0	75,5	80,2	89,6	93,2	100,9
62	71,1	76,6	81,4	90,8	94,4	102,2
63	72,2	77,7	82,5	92,0	95,6	103,4
64	73,3	78,9	83,7	93,2	96,9	104,7
65	74,4	80,0	84,8	94,4	98,1	106,0
66	75,4	81,1	86,0	95,6	99,3	107,3
67	76,5	82,2	87,1	96,8	100,6	108,5
68	77,6	83,3	88,3	98,0	101,8	110,0
69	78,6	84,4	89,4	99,2	103,0	111,1
70	79,7	85,5	90,5	100,4	104,2	112,3
71	80,8	86,6	91,7	101,6	105,4	113,6
72	81,9	87,7	92,8	102,8	106,6	114,8
73	83,0	88,9	93,9	104,0	107,9	116,1
74	84,0	90,0	95,1	105,2	109,1	117,3
75	85,1	91,1	96,2	106,4	110,3	118,6
76	86,1	92,2	97,4	107,6	111,5	119,9
77	87,2	93,3	98,5	108,8	112,7	121,1
78	88,3	94,4	99,6	110,0	113,9	122,3
79	89,3	95,5	100,7	111,1	115,1	123,6
80	90,4	96,6	101,9	112,3	116,3	124,8

### 5. Квантили распределения Фишера $F_{1-p}$

$f_2$	$F_{1-p}$ при уровне значимости $p=0.05$ для $f_1$								
	1	2	3	4	5	6	12	24	$\infty$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9	249,0	254,3
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7	4,5	4,4
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0	3,8	3,7
7	5,6	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6	3,4	3,2
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	2,9	2,7
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9	2,7	2,5
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8	2,6	2,4
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7	2,5	2,3
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6	2,4	2,2
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5	2,3	2,1
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,0
17	4,5	3,6	3,2	3,0	2,8	2,7	2,4	2,2	2,0
18	4,4	3,6	3,2	2,9	2,8	2,7	2,3	2,1	1,9
19	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
20	4,4	3,5	3,1	2,9	2,7	2,6	2,3	2,1	1,8
22	4,3	3,4	3,1	2,8	2,7	2,6	2,2	2,0	1,8
24	4,3	3,4	3,0	2,8	2,6	2,5	2,2	2,0	1,7
26	4,2	3,4	3,0	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,7
28	4,2	3,3	2,9	2,7	2,6	2,4	2,1	1,9	1,6
30	4,2	3,3	2,9	2,7	2,5	2,4	2,1	1,9	1,6
40	4,1	3,2	2,9	2,6	2,5	2,3	2,0	1,8	1,5
60	4,0	3,2	2,8	2,5	2,4	2,3	1,9	1,7	1,4
120	3,9	3,1	2,7	2,5	2,3	2,2	1,8	1,6	1,3
$\infty$	3,8	3,0	2,6	2,4	2,2	2,1	1,8	1,5	1,0

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Уровень значимости 0,01

1	4052	4999	5403	5625	5764	5859	6106	6234	6366
2	98,5	99,0	99,2	99,3	99,3	99,4	99,4	99,5	99,5
3	34,1	30,8	29,5	28,7	28,2	27,9	27,1	26,6	26,1
4	21,2	18,0	16,7	16,0	15,5	15,2	14,4	13,9	13,5
5	16,3	13,3	12,1	11,4	11,0	10,7	9,9	9,5	9,0
6	13,7	10,9	9,8	9,2	8,8	8,5	7,7	7,3	6,9
7	12,3	9,6	8,5	7,9	7,5	7,2	6,5	6,1	5,7
8	11,3	8,7	7,6	7,0	6,6	6,4	5,7	5,3	4,9
9	10,6	8,0	7,0	6,4	6,1	5,8	5,1	4,7	4,3
10	10,0	7,6	6,6	6,0	5,6	5,4	4,7	4,3	3,9
11	9,7	7,2	6,2	5,7	5,3	5,1	4,4	4,0	3,6
12	9,3	6,9	6,0	5,4	5,1	4,8	4,2	3,8	3,4
13	9,1	6,7	5,7	5,2	4,9	4,6	4,0	3,6	3,2
14	8,9	6,5	5,6	5,0	4,7	4,5	3,8	3,4	3,0
15	8,7	6,4	5,4	4,9	4,6	4,3	3,7	3,3	2,9
16	8,5	6,2	5,3	4,8	4,4	4,2	3,6	3,2	2,8
17	8,4	6,1	5,2	4,7	4,3	4,1	3,5	3,1	2,7
18	8,3	6,0	5,1	4,6	4,3	4,0	3,4	3,0	2,6
19	8,2	5,9	5,0	4,5	4,2	3,9	3,3	2,9	2,4
20	8,1	5,9	4,9	4,4	4,1	3,9	3,2	2,9	2,4
22	7,9	5,7	4,8	4,3	4,0	3,8	3,1	2,8	2,3
24	7,8	5,6	4,7	4,2	3,9	3,7	3,0	2,7	2,2
26	7,7	5,5	4,6	4,1	3,8	3,6	3,0	2,6	2,1
28	7,6	5,5	4,6	4,1	3,8	3,5	2,9	2,5	2,1
30	7,6	5,4	4,5	4,0	3,7	3,5	2,8	2,5	2,0
40	7,3	5,2	4,3	3,8	3,5	3,3	2,7	2,3	1,8
60	7,1	5,0	4,1	3,7	3,3	3,1	2,5	2,1	1,6
120	6,9	4,8	4,0	3,5	3,2	3,0	2,3	2,0	1,4
∞	6,6	4,6	3,8	3,3	3,0	2,8	2,2	1,8	1,0

### 6. Квантили распределения Кохрана $G_{1-p}$

k	$G_{1-p}$ при уровне значимости $p=0,05$ для $f$													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	16	36	144	$\infty$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	9985	9750	9392	9057	8772	8534	8332	8159	8010	7880	7341	6602	5813	5000
3	9669	8709	7977	7457	7071	6771	6530	6333	6167	6025	5466	4748	4031	3333
4	9065	7679	6841	6287	5895	5598	5365	5175	5017	4884	4366	3720	3093	2500
5	8412	6838	5981	5441	5065	4783	4564	4387	4241	4118	3645	3066	2513	2000
6	7808	6161	5321	4803	4447	4184	3980	3817	3682	3568	3135	2612	2119	1667
7	7271	5612	4800	4307	3974	3726	3535	3384	3259	3154	2756	2278	1833	1429
8	6798	5157	4377	3910	3595	3362	3185	3043	2926	2829	2462	2022	1616	1250
9	6385	4775	4027	3584	3286	3067	2901	2768	2659	2568	2226	1820	1446	1111
10	6020	4450	3733	3311	3029	2823	2666	2541	2439	2353	2032	1655	1308	1000
12	5410	3924	3264	2880	2624	2439	2299	2187	2098	2020	1737	1403	1100	8333
15	4709	3346	2758	2419	2195	2034	1911	1815	1736	1671	1429	1144	889	667
20	3894	2705	2205	1921	1735	1602	1501	1422	1357	1303	1108	879	675	500
24	3434	2354	1907	1656	1493	1374	1286	1216	1160	1113	942	743	567	417
30	2929	1980	1593	1377	1237	1137	1061	1002	958	921	771	604	457	333
40	2370	1576	1259	1082	968	887	827	780	745	713	595	462	347	250
60	1737	1131	895	765	682	623	583	552	520	497	411	316	234	167
120	0998	0632	0495	0419	0371	0337	0312	0292	0279	0266	0218	0165	0120	0083
$\infty$	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Уровень значимости 0,01														
2	9999	9950	9794	9586	9373	9172	8998	8823	8674	8539	7949	7067	6062	5000
3	9933	9423	8831	8335	7933	7606	7335	7107	6912	6743	6059	5153	4230	3333
4	9676	8643	7814	7212	6761	6410	6129	5897	5702	5536	4884	4057	3251	2500
5	9279	7885	6957	6329	5875	5531	5259	5037	4854	4697	4094	3351	2644	2000
6	8828	7218	6258	5635	5195	4866	4608	4401	4229	4084	3529	2858	2229	1667
7	8376	6644	5685	5080	4659	4347	4105	3911	3751	3616	3105	2494	1929	1429
8	7945	6152	5209	4627	4226	3932	3704	3522	3373	3248	2779	2214	1700	1250
9	7544	5727	4810	4251	3870	3592	3378	3207	3067	2950	2514	1992	1521	1111
10	7175	5358	4469	3934	3572	3308	3106	2945	2813	2704	2297	1811	1376	1000
12	6528	4751	3919	3427	3099	2861	2680	2535	2419	2320	1961	1535	1157	0833
15	5747	4069	3317	2882	2593	2386	2228	2104	2002	1918	1612	1251	0934	0667
20	4799	3297	2654	2288	2048	1877	1748	1646	1567	1501	1248	0960	0708	0500
24	4247	2871	2295	1970	1759	1608	1495	1406	1338	1283	1060	0810	0595	0417
30	3632	2412	1913	1635	1454	1327	1232	1157	1100	1054	0867	0658	0480	0333
40	2940	1915	1508	1281	1135	1033	0957	0898	0853	0816	0668	0503	0363	0250
60	2151	1371	1069	0902	0796	0722	0668	0625	0594	0567	0461	0344	0245	0167
120	1225	0759	0585	0489	0429	0387	0357	0334	0316	0302	0242	0178	0125	0083
$\infty$	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000

Примечание. В таблице содержатся десятичные знаки квантилей. Например, при  $k=10$ ,  $f=6$ ,  $G_{0,99}=0,3308$ .

**7. Данные для последовательных приспосабливающих испытаний  
автоматических линий**

1	2	Суммарная наработка в циклах, соответствующая количеству отказов									
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Наработка на отказ $T_1$ в циклах	Число отказов на 100 циклов	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
166	0,6	—	264	528	211	475	739	1003	1267	1530	1794
125	0,8	—	581	1109	792	1056	1320	1583	1847	2111	2375
100	1,0	—	437	397	159	357	556	755	954	1152	1352
83,3	1,2	—	—	199	596	795	994	1192	1391	1590	1789
71,4	1,4	—	—	636	1034	1232	1431	1630	1829	2027	2226
62,5	1,6	—	—	159	318	477	636	795	954	1113	1272
55,5	1,8	—	—	509	668	827	986	1145	1304	1463	1622
50	2,0	—	—	132	265	397	530	662	795	927	1060
45,5	2,2	—	—	291	423	556	688	821	953	1086	1218
41,6	2,4	—	—	—	99	199	298	397	497	596	696
38,5	2,6	—	—	—	318	417	517	616	716	815	914
		—	—	—	—	79	179	278	377	477	576
		—	—	—	—	79	179	278	377	477	576
		—	—	—	—	158	247	335	423	511	600
		—	—	—	—	158	247	335	423	511	600
		—	—	—	—	353	441	529	618	706	794
		—	—	—	—	353	441	529	618	706	794
		—	—	—	—	547	636	724	812	900	989
		—	—	—	—	547	636	724	812	900	989
		—	—	—	—	70	158	247	335	423	511
		—	—	—	—	70	158	247	335	423	511
		—	—	—	—	265	353	441	529	618	706
		—	—	—	—	265	353	441	529	618	706
		—	—	—	—	459	547	636	724	812	900
		—	—	—	—	459	547	636	724	812	900
		—	—	—	—	63	143	222	302	381	461
		—	—	—	—	63	143	222	302	381	461
		—	—	—	—	238	318	397	477	556	636
		—	—	—	—	238	318	397	477	556	636
		—	—	—	—	413	493	572	652	731	811
		—	—	—	—	413	493	572	652	731	811
		—	—	—	—	58	130	203	275	347	419
		—	—	—	—	58	130	203	275	347	419
		—	—	—	—	217	289	361	433	506	578
		—	—	—	—	217	289	361	433	506	578
		—	—	—	—	375	447	520	592	664	737
		—	—	—	—	375	447	520	592	664	737
		—	—	—	—	53	119	186	252	318	384
		—	—	—	—	53	119	186	252	318	384
		—	—	—	—	199	265	331	397	464	530
		—	—	—	—	199	265	331	397	464	530
		—	—	—	—	344	410	477	543	609	675
		—	—	—	—	344	410	477	543	609	675
		—	—	—	—	49	110	171	233	294	355
		—	—	—	—	49	110	171	233	294	355
		—	—	—	—	183	245	306	367	428	489
		—	—	—	—	183	245	306	367	428	489
		—	—	—	—	318	379	440	491	562	623
		—	—	—	—	318	379	440	491	562	623

## Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
35,7	2,8	—	—	—	46	102	159	216	273	330	386
		—	57	113	170	227	284	341	397	454	511
		124	181	238	295	352	408	465	522	579	635
33	3,0	—	—	—	42	95	147	200	252	305	357
		—	52	105	157	210	262	315	367	420	472
		115	167	220	272	325	377	430	482	535	587

Примечание. Для каждой наработки первая строка соответствует линии браковки, вторая—линии усеченных испытаний, третья—линии приемки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Базовский И.* Надежность. Теория и практика. М., 1965.
2. *Бетхер В. Н., Пикус М. Ю., Шевченко В. С.* Стенд для испытаний на долговечность аксиально-поршневых гидромашин.—В сб.: Прогрессивная технология машиностроения. Вып. 2. Минск, 1971.
3. *Борщевский В. М., Вассерман М. С., Пащенко Э. А.* Методы нагружения и стенды для проведения ускоренных испытаний нормализованных узлов агрегатных станков —В сб.: Методы ускоренных испытаний на надежность и долговечность деталей, узлов, машин. Труды совещания в Минске 19—21 сентября 1967 г. М., 1967.
4. *Владзиевский А. П.* Автоматические линии в машиностроении. Кн. 1. М., 1958.
5. *Волосов С. С.* Технологические и метрологические основы точности регулирования размеров в машиностроении. М., 1964.
6. *Вороничев Н. М., Генич М. Б., Тартаковский Ж. Э.* Выбор и оценка компоновок автоматических линий из агрегатных станков. — «Вестник машиностроения», 1970, № 1.
7. *Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б.* Модели отказов. М., 1966.
8. *ГОСТ 13377—67.* Надежность в технике. Термины. М., 1968.
9. *ГОСТ 16503—70.* Промышленные изделия. Номенклатура и характеристика основных показателей надежности. М., 1971.
10. *ГОСТ 16429—70.* Трение и изнашивание в машинах. Основные термины и определения. М., 1971.
11. *Добролюбов А. И., Капралов Л. И., Церкович Р. Л.* Функциональные циклограммы электрических и гидравлических схем автоматизированных станков и автоматических линий. Минск, 1969.
12. *Добролюбов А. И., Кузьмин А. В.* Надежность автоматики и технический прогресс. Минск, 1962.
13. Единая система плано-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий. М., 1967.
14. *Елизаветин М. А., Сатель Э. А.* Технологические способы повышения долговечности машин (повышение эксплуатационных свойств и надежности работы деталей машин). М., 1969.
15. *Кавцевич А. М., Соболев А. С.* Условия проведения ускоренных испытаний нормализованных силовых узлов на надежность. — В сб.: Показатели надежности станочных систем и методы их оценки. Труды семинаров, проведенных в ЭНИИМАШ 30/XI—1/XII 1967 г. Минск, 1968.
16. *Карташова А. Н.* Достоверность измерений и критерии качества испытания приборов М., 1967.



17. *Кемпинский М. М.* Точность и надежность измерительных приборов. М., 1972.
18. *Липидус А. С., Марголин Л. В., Портман В. Т., Пратусевич Р. М.* Методика изучения надежности металлорежущих станков в эксплуатации. М., 1969.
19. *Лимаренко Г. Н.* Координация работ служб надежности на заводах станкостроения и методическое руководство исследованиями надежности выпускаемых станков в условиях эксплуатации. — В сб.: О работе служб надежности на предприятиях станкоинструментальной промышленности по изучению надежности выпускаемых изделий в условиях эксплуатации. М., 1969.
20. *Ллойд Д., Липов М.* Надежность. Организация исследования, методы, математический аппарат. М., 1964.
21. *Марков Н. Н., Кайнер Г. Б., Сацердотов П. А.* Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. М., 1967.
22. *Мартынов Г. К.* Общие требования к программе обеспечения надежности промышленных изделий. — В сб.: Научные основы надежности и статистических методов контроля качества. Лекции, прочитанные в ДНТПС. М., 1973.
23. *Мартынов Г. К.* Стандартизация терминов в области надежности. — В сб.: Научные основы надежности и статистических методов контроля качества. М., 1973.
24. *Меламед Г. И.* Производительность и эффективность автоматических линий. Минск, 1972.
25. *Меламед Г. И., Счастливец Ф. Е.* Надежность и долговечность станочных систем. Минск, 1967.
26. *Минскер Э. И.* Пути повышения надежности систем электрооборудования и способы ускорения поисков источников неполадок. — В сб.: Проектирование и эксплуатация автоматических линий механической обработки. М., 1962.
27. *Налимов В. В., Чернова Н. А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., 1965.
28. *Наследышев Ю. К., Самойленко А. В., Скорыцин Ю. В., Вишумирский Р. П.* Оценка долговечности направляющих базовых деталей станков. — «Станки и инструмент», 1972, № 8.
29. *Оганян А. А., Монахов Г. А.* Надежность и долговечность металлорежущих станков. М., 1971.
30. *Пешес Л. Я., Степанова М. Д.* Основы теории ускоренных испытаний на надежность. Минск, 1972.
31. *Портман В. Т., Липидус А. С., Чижов Б. Н., Александер В. Р.* Измерение износа с помощью записей микропрофиля. — «Станки и инструмент», 1972, № 2.
32. *Пратусевич Р. М.* Ускоренные стендовые испытания приводных механизмов металлорежущих станков на долговечность по устойчивости. — В сб.: Методы ускоренных испытаний на надежность и долговечность деталей, узлов, машин. Труды совещания в Минске 19—21 сентября 1967 г. М., 1967.
33. *Приборостроение и средства автоматизации. Справочник. Т. 1.* М., 1963.
34. *Проников А. С.* Основы надежности и долговечности машин. М., 1969.
35. *Пустыльник Е. И.* Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., 1968.

36. *Решетов Д. Н.* Надежность металлорежущих станков и пути ее повышения. — «Вестник машиностроения», 1962, № 2.

37. *Скорынин Ю. В.* Ускоренные испытания деталей, машин и оборудования на износостойкость. Минск, 1972.

38. *Соколов Ю. Н.* Температурные деформации металлорежущих станков. — В сб.: «Автоматизация привода и управления машин». М., 1967.

39. *Счастливенко Ф. Е., Наследышев Ю. К., Скорынин Ю. В.* Пути повышения качества изделий и улучшения системы его контроля на станкостроительных предприятиях. — В сб.: Качество и надежность металлообрабатывающего оборудования. Сборник материалов семинаров, проведенных в ЭНИИМАШ с 5 по 20 января 1969 г. М., 1969.

40. *Счастливенко Ф. Е., Семенов Г. В.* Экспериментальное исследование влияния старения механизмов бесцентрово-шлифовальных станков на качество обработки. — В сб.: Некоторые вопросы технологической надежности и ускоренных испытаний металлорежущих станков. Минск, 1968.

41. *Счастливенко Ф. Е., Новожилов О. Ю., Скорынин Ю. В., Наследышев Ю. К.* Техничко-экономическая оценка методов определения износа деталей машин и оборудования. Минск, 1971.

42. *Счастливенко Ф. Е., Харитонов Е. М., Семенов Г. В.* Исследование металлорежущих станков на технологическую надежность (по оценке долговечности направляющих металлорежущих станков). Минск, 1969.

43. Техническая диагностика и вычислительная техника в ремонтном производстве. Материалы семинара. М., 1972.

44. Технологическая надежность станков. Коллектив авторов. Под общей редакцией доктора техн. наук, проф. А. С. Проникова. М., 1971.

45. *Туллер А. Г., Конюх А. И.* Надежность и производительность автоматических станочных линий. М., 1968.

46. *Тусупбеков М. Р.* Моделирование автоматической линии на ЭЦВМ. — «Механизация и автоматизация», 1970, № 8.

46. *Хрущов М. М.* Основные виды и закономерности изнашивания. — В сб.: Основные вопросы надежности и долговечности машин. М., 1969.

48. *Шевченко В. С., Бетхер В. Н., Лапотко О. П.* Долговечность гидравлического оборудования станков. Минск, 1973.

49. *Эрншер Ю. Б.* Надежность и структура автоматических станочных систем. М., 1962.

50. *Яковлев Г. М.* Технологические основы надежности и долговечности машин (вопросы выносливости деталей машин). Минск, 1964.

51. *Ящерицын П. И., Плашей Г. И., Конюх А. И.* Количественная оценка надежности и производительности автоматических станочных линий на стадии проектирования (из опыта работы Минского СКБАЛ). Минск, 1972.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ\*

- Безотказность 9, 10
- Вероятность безотказной работы** 16, 49, 147, 157  
— восстановления 27  
— отказа 16
- Вероятностная бумага нормальная** 117—119, 121  
— экспоненциальная 120, 121
- Долговечность** 9, 160
- Изделие** 7  
— неремонтируемое 8, 10  
— ремонтируемое 8
- Измерение** 132
- Измерительный прибор** 133
- Изнашивание** 34  
— абразивное 35  
— коррозионно-механическое 36  
— при заедании 35
- Износ** 34  
— линейный 92
- Интенсивность восстановления** 27  
— изнашивания 92  
— отказов 17—20
- Испытания контрольные** 90, 91  
— многофакторные 91, 121, 122, 126  
— однофакторные 91  
— определительные 90  
— последовательные 126—131  
— сравнительные 90  
— стендовые 100, 106—108
- Контроль** 132  
— активный 134
- Коробление деталей** 37
- Коэффициент готовности** 28, 50
- автоматических линий 49, 58—60  
— технического использования 28, 49, 50, 151, 157  
— технологической надежности 42
- Межремонтное обслуживание** 74
- Межремонтный период** 76
- Мера** 133  
— многозначная 133  
— однозначная 133
- Метод вырезанных лунок** 93, 94  
— микрометрирования 92, 93  
— поверхностной активации 95—97  
— полного факторного эксперимента 123—126  
— профилографирования 95
- Надежность** 9
- Наработка** 9  
— на отказ 26, 49  
— до первого отказа средняя 15
- Независимость элементов** 52
- Неисправность** 8
- Отказ** 8  
— по параметру 30  
— функционирования 30, 156
- Параметр потока отказов** 26, 43—45, 49, 62
- Пластические деформации деталей** 39
- Плотность распределения наработки до отказа** 16
- Поток восстановлений** 11  
— отказов 11

\* Составил А. И. Кочергин

Работоспособность 8  
Распределение Вейбулла 24  
— нормальное 23  
— экспоненциальное 22, 151  
Резерв точности станка 41, 42  
Резервирование 51  
— ненагруженное 51, 52  
— общее 52  
— постоянное 51  
— раздельное 52  
Ремонт капитальный 75  
— малый 74  
— средний 74  
Ремонтопригодность 9  
Ресурс 14  
— гамма-процентный 14  
— назначенный 14  
  
Скорость изнашивания 92  
Соединение элементов параллельное 51, 53

— последовательное 50, 52  
Сохраняемость 9, 160  
Среднее время восстановления 27, 49  
Срок службы 14  
— хранения 14  
Стенды 100—106, 148  
Структура ремонтного цикла 76

Трудоемкость технического обслуживания средняя 14  
— удельная 14

Усталостное выкрашивание 39  
Усталостные поломки 39

Функциональная циклограмма 77, 79, 80  
Функция восстановления 25

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	3
<b>Глава 1. Основные понятия теории надежности</b>	<b>7</b>
1. 1. Термины теории надежности	7
1. 2. Функционирование неремонтируемых и ремонтируемых изделий	10
1. 3. Общая характеристика испытаний на надежность	12
1. 4. Показатели надежности, общие для неремонтируемых и ремонтируемых изделий	14
1. 5. Показатели надежности неремонтируемых изделий	15
1. 6. Изменение интенсивности отказов во времени и общая формула для вероятности безотказной работы	20
1. 7. Примеры распределений наработки до отказа неремонтируемых изделий	21
1. 8. Показатели надежности ремонтируемых изделий	25
<b>Глава 2. Процессы, происходящие в станках в период их эксплуатации</b>	<b>29</b>
2. 1. Вредные воздействия на станки и вызываемые ими отказы	29
2. 2. Процессы, снижающие работоспособность станков	31
2. 3. Разрушения деталей станков	38
2. 4. Изменение показателей качества станков во времени	40
2. 5. Изменение параметра потока отказов металлорежущего оборудования во времени	43
<b>Глава 3. Обеспечение надежности металлорежущих станков и автоматических линий в процессе их проектирования и изготовления</b>	<b>46</b>
3. 1. Общая схема обеспечения надежности при проектировании [22]	46
3. 2. Выбор показателей надежности металлорежущего оборудования	47
3. 3. Расчет вероятности безотказной работы системы	50
3. 4. Методы расчета показателей надежности станков и автоматических линий	57
3. 5. Некоторые технологические и организационные методы, способствующие повышению надежности станков	65
3. 6. Группы надежности на станкостроительных заводах	68

<b>Глава 4. Поддержание надежности металлорежущего оборудования в эксплуатации</b>	<b>70</b>
4. 1. Типичные недостатки в эксплуатации станков	70
4. 2. Рекомендуемые методы эксплуатации станков	71
4. 3. Система планово-предупредительного ремонта металлорежущего оборудования (система ППР)	74
4. 4. Техническая диагностика оборудования	76
<b>Глава 5. Пути повышения надежности гидро- и электросистем</b>	<b>81</b>
5. 1. Сохранение эксплуатационных свойств рабочих жидкостей	81
5. 2. Методы повышения безотказности и ремонтпригодности электросистем управления	86
<b>Глава 6. Методы изучения надежности изделий</b>	<b>89</b>
6. 1. Испытания на надежность	89
6. 2. Испытания на износостойкость	91
6. 3. Эксплуатационные наблюдения	97
6. 4. Стендовые испытания	100
6. 5. Пути сокращения продолжительности стендовых испытаний	107
6. 6. Ускорение испытаний ужесточением характеристик среды или режима работы	108
6. 7. О статистических методах обработки наблюдений	111
6. 8. Статистическая оценка параметров распределения	113
6. 9. Проверка статистических гипотез	115
6. 10. Многофакторные испытания на надежность	121
6. 11. Последовательные испытания на надежность	126
<b>Глава 7. Общие сведения о линейных измерениях в машиностроении и приборостроении</b>	<b>132</b>
7. 1. ГОСТ 16263—70 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения»	132
7. 2. Виды средств измерений и контроля	133
7. 3. Нормирование погрешности измерительных приборов	134
<b>Глава 8. Достоверность измерительной информации о значениях измеряемых физических величин</b>	<b>139</b>
8. 1. Достоверность измерительной информации при измерении [19]	139
8. 2. Достоверность измерительной информации о значениях измеряемой величины при пассивном контроле [27]	140
8. 3. Достоверность измерительной информации при активном контроле [6]	143

<b>Глава 9. Показатели надежности измерительных приборов</b>	<b>145</b>
9. 1. Показатели надежности настройки	145
9. 2. Показатели надежности при грубых ошибках контроля	150
9. 3. Показатели ремонтпригодности за короткое время эксплуатации прибора	151
9. 4. Показатели точностной надежности	152
9. 5. Показатели надежности приборов при отказах функционирования	156
9. 6. Показатели ремонтпригодности за длительный период эксплуатации приборов	157
9. 7. Экономические показатели надежности измерительных приборов	158
9. 8. Показатели сохраняемости приборов	160
9. 9. Показатели долговечности приборов	160
<b>Приложение</b>	<b>162</b>
<b>Литература</b>	<b>175</b>
<b>Предметный указатель</b>	<b>178</b>

**Кочергин А. И., Ковалев Л. Д.**

**К 55** Основы надежности металлорежущих станков и измерительных приборов. Минск, «Вышэйш. школа», 1974.

184 с. с ил.

Учебное пособие для студентов специальностей «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты», «Приборы точной механики» вузов.

Пособие охватывает вопросы, связанные с обеспечением требуемого уровня надежности металлорежущих станков, автоматических линий, измерительных инструментов и приборов.

К  $\frac{3124 - 152}{М304 (05) - 74}$  58—74

6П4. 6+6П5. 8



*Кочергин Анатолий Иванович  
Ковалев Лев Дмитриевич*

**ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ  
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

Редактор *Ж. И. Васюк*  
Обложка *Ю. И. Капитонова*  
Худож. редактор *Г. И. Важнов*  
Техн. редактор *М. Н. Кислякова*  
Корректор *Л. А. Шлыкович*

АТ 11622. Сдано в набор 19/IV 1974 г. Подписано к печати 30/X. Бумага 84×108<sup>1</sup>/<sub>2</sub>. Типогр. № 1. Печ. л. 5,75 (9,66). Уч. изд. л. 9,66. Изд. № 71-129. Тираж 2000 экз. Цена 35 коп.

Издательство «Высшая школа» Государственного комитета Совета Министров БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Редакция литературы по технике. 220600, Минск, ул. Кирова, 24.

Типография «Победа» Государственного комитета Совета Министров БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Молодечно, Привокзальный пер., 11.