

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет»

Т. А. Алексеева

## ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ И СЕРТИФИКАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Учебно-методический комплекс  
для студентов радиотехнического факультета специальности  
1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование»

Новополоцк  
ПГУ  
2010

УДК 629.063.2(075.8)  
ББК 38.763я73  
Б90

Рекомендовано к изданию методической комиссией  
радиотехнического факультета в качестве  
учебно-методического комплекса (протокол № 9 от 17.12.2007)

Рецензенты:

начальник испытательного центра РПУП «Завод Измеритель» Н.Н. Юхневич;  
зав.каф. технической кибернетики УО «ПГУ» Р.П. Богуц

**Алексеева, Т. А.**

**Б90**

Испытания, контроль и сертификация радиоэлектронных систем :  
учеб.-метод. комплекс для студентов радиотехнического факультета  
специальности 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проекти-  
рование» / Т. А. Алексеева. – Новополоцк : ПГУ, 2010. – 360 с.

**ISBN 978-985-531-017-5.**

Рассмотрены программы и методики различных видов испытаний, ор-  
ганизация контроля, методы управления качеством продукции и организация  
сертификации РЭС; испытательное оборудование, применяемое для имитации  
воздействия окружающей среды, и средства измерений для контроля режимов  
работы РЭС и испытательного оборудования.

Предназначен для преподавателей и студентов вузов данной специаль-  
ности.

**УДК 629.063.2(075.8)**  
**ББК 38.763я73**

**ISBN 978-985-531-017-5**

© Алексеева Т. А., 2010  
© УО «Полоцкий государственный университет», 2010

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее острых проблем создания современных радиоэлектронных средств является проблема контроля качества (в том числе испытаний РЭС, оценки их надежности, методика и технология контроля и т.п.).

Еще относительно недавно, на заре развития полупроводниковой техники и комплексной миниатюризации РЭС, проблемы контроля качества хоть и включались в единый технологический процесс проектирования и производства, но считались второстепенными, вспомогательными. В общей методологии контроля и испытаний отсутствовала системность, комплексность, логичное вхождение задач контроля в структуру технологического процесса производства деталей и сборочных единиц, не говоря уже о том, что практически отсутствовала и методика контроля в процессе проектирования. На предприятиях отсутствовали единые службы управления качеством. Все сложные и многообразные функции контроля возлагались на отделы технического контроля (ОТК).

Вместе с тем нельзя сказать, что это проблема не развивалась вовсе, просто подчас отсутствовала единая теоретическая база, единая система классификации методов контроля, факторов, воздействующих на РЭС, единая методика и технология организации испытаний и контроля. Сейчас говорить о второстепенности контроля и испытаний в условиях, когда, например, в производстве изделий электронной техники каждая четвертая операция является контрольно-измерительной или испытательной, просто недопустимо.

В то же время, с развитием комплексной микроминиатюризации РЭС многие восприняли ее как некую панацею в решении проблем качества и надежности, причем с углублением этого процесса и увеличением внешней интеграции это заблуждение стало еще бóльшим.

Может ли «спасти», как считают некоторые специалисты, проблему качества и надежности изделий РЭС, построенных с применением изделий микроэлектроники, перевод схемотехнической электроники на методы интеграции на пластине или создание «суперкристаллов»? Многие думают, что при этом (при уходе в «объем») проблема межсоединений (до 80 % дефектов в РЭС) пропадет или решится сама собой. Можно таким образом уйти от «тирании межсоединений», как называют эту проблему специалисты. Однако, уйдя на этот естественный для развития микроэлектроники

путь, проблема качества не только не упрощается, она даже еще больше обостряется, усложняется, так как она перемещается в сложнейшие технологические процессы получения таких изделий, в которых необходимо контролировать прецизионные режимы, материалы, и т.п. Таким образом, проблемы контроля и испытаний перемещаются в технологическом процессе в еще более сложно контролируруемую зону.

Возрастает трудоемкость таких испытаний и контроля, усложняется их организация и метрологическое обеспечение, хотя, например, отработана методика и инструментальное обеспечение непрерывного контроля параметров сложных технологических процессов.

В настоящее время среди специалистов в области разработки, технологии и организации производства РЭС нет единогласия по ряду теоретических проблем контроля качества. Это обстоятельство, естественно, сказалось на изложении некоторых конкретных вопросов методики и технологии контроля и испытаний в этом УМК.

Центральный вопрос современной дискуссии может быть сформулирован так: каково отношение общего (традиционного) и специального (специфического) в развитии различных методов и технологий контроля и испытаний (и соответственно – возможности построения единых, глобальных систем управления качеством РЭС)? Существует ли такое единое, генеральное направление развития этих методов (при неизбежных частных вариантах методов), на которое могла бы наращиваться вся теория и методика взглядов на эти проблемы (при их развитии в ближайшем будущем)? Или традиционные методы испытания и контроля будут в ближайшие годы перечеркнуты развитием новых идей создания РЭС, новыми наукоемкими технологиями?

Характер и сущность новых функциональных идей создания современных РЭС, новых наукоемких технологий хоть и может вызывать (несомненно вызовет!) новые методики и технологии контроля и испытаний РЭС, но не будет противоречить общим теоретическим и методологическим принципам и даже иерархическим классификационным структурам, которые положены сейчас в основу организации систем контроля и испытания РЭС, в построение глобальных систем управления качеством.

Под неизбежным воздействием факторов функционального, технологического и экономического обновления (в том числе дальнейшего развития микроминиатюризации) они будут видимо эволюционно совершенствоваться, развиваться, уступая постепенно место новым решениям.



## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

### Цель преподавания дисциплины

Цель преподавания дисциплины состоит в приобретении студентами знаний и навыков в области основ теории испытаний, основных видов и методов испытаний РЭС.

### Задачи изучения дисциплины

Для достижения поставленной цели и решения поставленных задач в результате изучения дисциплины «Испытания, контроль и сертификация РЭС» студент должен:

- **знать:**
  - характеристики внешних факторов, воздействующих на РЭС;
  - методы и методики испытаний и контроля РЭС;
  - методы контроля и управления качеством продукции;
  - принципы организации работ по сертификации продукции;
  - характеристики и принцип действия испытательного оборудования и средств измерения параметров РЭС;
- **уметь характеризовать:**
  - внешние воздействия и виды испытаний;
  - методы статистического приемочного контроля и управления качеством продукции;
- **уметь анализировать:**
  - основные направления и тенденции развития методов и средств испытаний и контроля РЭС;
- **приобрести навыки:**
  - формирования на основании технических условий для изделия требований к методам и средствам испытаний и контролю качества РЭС;
  - разработки программы и методики испытаний РЭС;
  - организации и проведения испытаний и контроля РЭС;
  - использования статистических методов контроля и управления качеством продукции;
  - обработки результатов испытаний методами математической статистики;
  - грамотного обоснования выбора испытательного оборудования и средств измерения режимов работы РЭС;
  - организации работ по сертификации РЭС.

## Место дисциплины в учебном процессе

Лекции по этой дисциплине проводятся для подготовки инженеров по специальности 1-39 02 01.

Перечень дисциплин, усвоение которых необходимо студентам для изучения данной дисциплины:

«Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭС»;

«Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства»;

«Конструирование радиоэлектронных устройств».

## Содержание дисциплины

Дисциплина «Испытания, контроль и сертификация РЭС», согласно учебному плану по специальности, включает в себя виды занятий и формы контроля знаний, приведенные ниже.

Виды занятий, формы контроля знаний	
Курс	5
Семестр	9
Лекции, ч	64
Экзамен (семестр)	9
Зачет (семестр)	–
Практические (семинарские) занятия, ч	16
Лабораторные занятия, ч	16
Расчетно-графические работы (семестр)	–
Контрольные работы (семестр)	–
Курсовая работа (семестр/часы)	–
Курсовой проект (семестр/часы)	–
Управляемая самостоятельная работа (часы)	–

## Рабочая программа

Наименования разделов и тем лекций и их содержание	Число часов
1. Введение. Роль испытаний и контроля в повышении качества изделий РЭС. Сертификация – основа управления качеством РЭС	2
<b>Тема 1. Организация испытаний РЭС и основы теории испытаний</b>	6
2. Воздействующие факторы, виды и способы проведения испытаний	4
3. Планирование испытаний. Разработка программы и методики испытаний	2
<b>Тема 2. Организация, методики испытаний и испытательное оборудование</b>	44
4. Испытания на климатические воздействия	6
5. Испытания на механические и акустические воздействия	4
6. Испытания на биологические, химические и технологические воздействия	6
7. Испытания на космические и радиационные воздействия	2
8. Испытания РЭС на надежность	12
9. Испытания мелкосерийной и уникальной продукции. Контроль надежности в процессе разработки	4
10. Ускоренные испытания аппаратуры на надежность	4
11. Эффективность испытаний	2
12. Технический контроль РЭС	2
13. Автоматизация и метрологическое обеспечение испытаний и контроля	2
<b>Тема 3. Качество продукции. Статистические методы приемочного контроля и управления качеством продукции</b>	12
14. Качество продукции. Статистические методы управления качеством продукции	6
15. Статистические методы приемочного контроля качества продукции	4
16. Сертификация – основа управления качеством продукции	2
Всего:	64

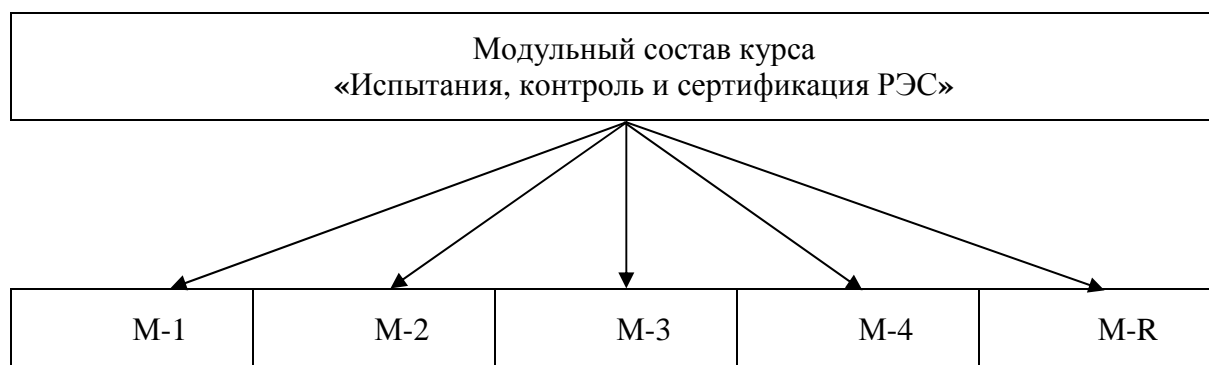
### Методические указания к изучению дисциплины

Для изучения дисциплины «Испытания, контроль и сертификация РЭС» предлагается модульная система. Весь материал разбит на четыре тематических модуля для использования на лекционных и лабораторных занятиях, причем каждый модуль содержит определенное количество учебных элементов (УЭ). Все УЭ содержат руководство к обучению, состоящее из цели, показывающей требования к знаниям и навыкам, которыми должны овладеть студенты в процессе изучения данного УЭ. В конце каждого модуля имеется УЭ контроля, содержащий вопросы, на которые необходимо ответить. При недостаточном выполнении выходного теста студенту потребуется вновь изучить данный модуль.

Целью лекционных занятий является освоение основной части теоретического материала по курсу.

Промежуточный контроль освоения теоретической части курса проводится в виде тестов, дважды в течение семестра, на аттестационных неделях. Тест состоит из 5 – 10 вопросов по пройденному материалу. Дата проведения теста объявляется заранее.

## СТРУКТУРА УЧЕБНОГО КУРСА



**М-1. Организация испытаний РЭС и основы теории испытаний.**

**М-2. Организация, методики испытаний и испытательное оборудование.**

**М-3. Качество продукции. Статистические методы приемочного контроля и управления качеством продукции.**

**М-4. Лабораторные занятия.**

## ВОПРОСЫ, ИЗУЧАЕМЫЕ НА ЛЕКЦИОННЫХ ЗАНЯТИЯХ

(по модулям)

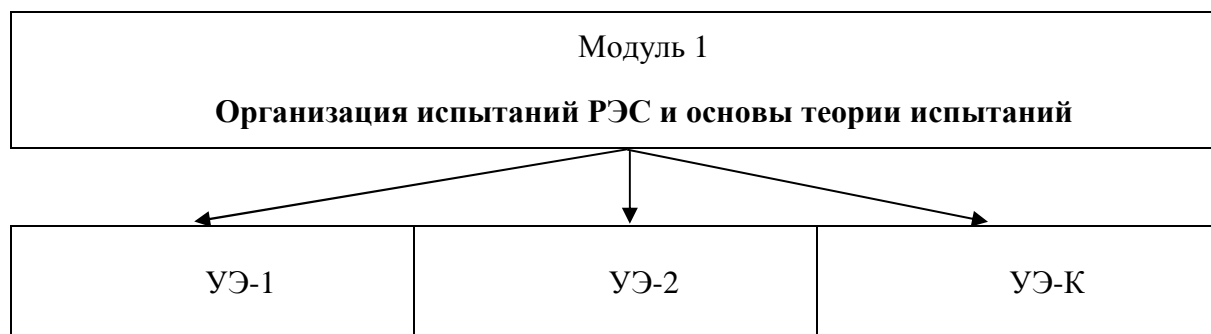
**Модуль 1. Организация испытаний РЭС и основы теории испытаний.** Воздействующие факторы, виды и способы проведения испытаний. Планирование испытаний. Разработка программы и методики испытаний.

**Модуль 2. Организация, методики испытаний и испытательное оборудование.** Испытания на климатические воздействия. Испытания на механические и акустические воздействия. Испытания на биологические, химические и технологические воздействия. Испытания на космические и радиационные воздействия. Испытания РЭС на надежность. Испытания мелкосерийной и уникальной продукции. Контроль надежности в процессе

разработки. Ускоренные испытания аппаратуры на надежность. Эффективность испытаний. Технический контроль РЭС. Автоматизация и метрологическое обеспечение испытаний и контроля.

**Модуль 3. Качество продукции. Статистические методы приемочного контроля и управления качеством продукции.** Качество продукции. Статистические методы управления качеством продукции. Статистические методы приемочного контроля качества продукции. Сертификация – основа управления качеством продукции.

**Модуль 4. Лабораторные занятия.**



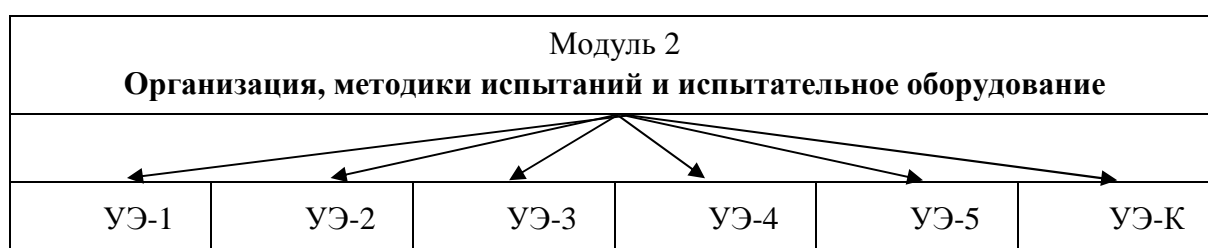
УЭ-1. Воздействующие факторы, виды и способы проведения испытаний.

УЭ-2. Планирование испытаний. Разработка программы и методики испытаний.

УЭ-К. Выходной контроль по модулю.

Модуль 1
<b>Организация испытаний РЭС и основы теории испытаний</b>
Руководство по обучению
УЭ-1. Воздействующие факторы, виды и способы проведения испытаний  Учебные цели УЭ-1 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Студент должен знать:                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- внешние и внутренние воздействующие факторы на изделия РЭС;</li> <li>- виды испытаний;</li> <li>- способы проведения испытаний.</li> </ul> </li> </ul> Для успешного овладения материалом УЭ-1 следует изучить учебные материалы УМК.

<p>УЭ- 2. Планирование испытаний. Разработка программы и методики испытаний</p> <p style="text-align: center;">Учебные цели УЭ-2</p> <p>Студент должен знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- правила разработки программ испытаний;</li> <li>- состав документации;</li> <li>- этапы планирования испытаний.</li> </ul> <p>Для успешного овладения материалом УЭ-2 следует изучить учебные материалы УМК.</p>
<p>УЭ-К. Выходной контроль по модулю</p> <p>После изучения этого модуля студент должен проверить свои знания.</p>



УЭ-1. Испытания на климатические воздействия.

УЭ-2. Испытания на механические и акустические воздействия.

УЭ-3. Испытания на биологические, химические и технологические воздействия. Испытания на космические и радиационные воздействия.

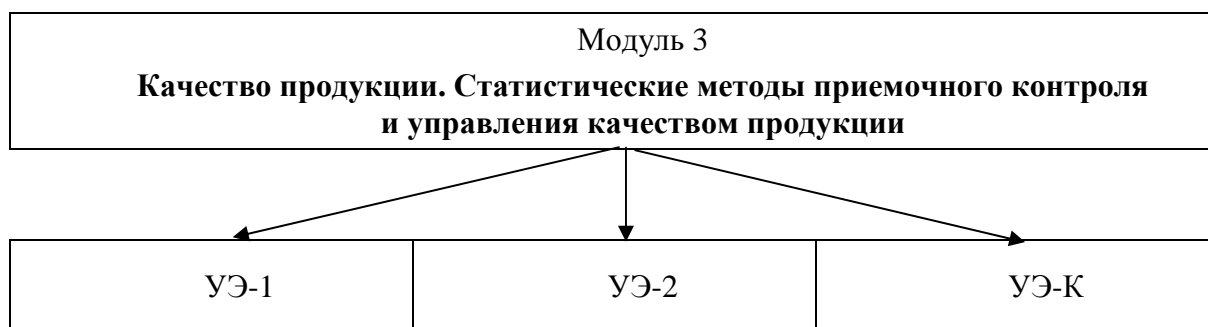
УЭ-4. Испытания РЭС на надежность. Испытания мелкосерийной и уникальной продукции. Контроль надежности в процессе разработки. Ускоренные испытания аппаратуры на надежность. Эффективность испытаний.

УЭ-5. Технический контроль РЭС. Автоматизация и метрологическое обеспечение испытаний и контроля.

УЭ-К. Выходной контроль по модулю.

<b>Модуль 2</b>
<b>Организация, методики испытаний и испытательное оборудование</b>
Руководство по обучению
<p>УЭ-1. Испытания на климатические воздействия</p> <p style="text-align: center;">Учебные цели УЭ-1</p> <p>Студент должен знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- цели и задачи климатических испытаний;</li> <li>- испытательное оборудование.</li> </ul> <p>Для успешного овладения материалом УЭ-1 следует изучить материалы УМК.</p>

<p>УЭ-2. Испытания на механические и акустические воздействия</p> <p style="text-align: center;">Учебные цели УЭ-2</p> <p>Студент должен знать:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- цели и задачи испытаний на механические воздействия;</li><li>- цели и задачи испытаний на акустические воздействия;</li><li>- характеристики испытательного оборудования.</li></ul> <p>Для успешного овладения материалом УЭ-2 следует изучить материалы УМК.</p>
<p>УЭ-3. Испытания на биологические, химические и технологические воздействия. Испытания на космические и радиационные воздействия</p> <p style="text-align: center;">Учебные цели УЭ-3</p> <p>Студент должен знать:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- цели и задачи испытаний на биологические, химические и технологические воздействия;</li><li>- цели и задачи испытаний на космические и радиационные воздействия;</li><li>- характеристики испытательного оборудования.</li></ul> <p>Для успешного овладения материалом УЭ-3 следует изучить материалы УМК.</p>
<p>УЭ-4. Испытания РЭС на надежность. Испытания мелкосерийной и уникальной продукции. Контроль надежности в процессе разработки. Ускоренные испытания аппаратуры на надежность. Эффективность испытаний.</p> <p style="text-align: center;">Учебные цели УЭ-4</p> <p>Студент должен знать:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- цели и задачи испытаний на надежность;</li><li>- цели и задачи ускоренных испытаний на надежность;</li><li>- методы контроля на надежность.</li></ul> <p>Для успешного овладения материалом УЭ-3 следует изучить материалы УМК.</p>
<p>УЭ-5. Технический контроль РЭС. Автоматизация и метрологическое обеспечение испытаний и контроля.</p> <p style="text-align: center;">Учебные цели УЭ-5</p> <p>Студент должен знать:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- цели и задачи технического контроля РЭ ;</li><li>- методы технического контроля РЭ ;</li><li>- метрологическое обеспечение испытаний.</li></ul>
<p>УЭ-К. Выходной контроль по модулю</p> <p>После изучения данного модуля студент должен проверить свои знания.</p>



УЭ-1. Качество продукции. Статистические методы управления качеством продукции. Статистические методы приемочного контроля качества продукции.

УЭ-2. Сертификация – основа управления качеством продукции.

УЭ-К. Выходной контроль по модулю.

<b>Модуль 3</b> <b>Качество продукции. Статистические методы приемочного контроля и управления качеством продукции</b>
<b>Руководство по обучению</b>
УЭ-1. Качество продукции. Статистические методы управления качеством продукции. Статистические методы приемочного контроля качества продукции
Учебные цели УЭ-1
Студент должен знать:
<ul style="list-style-type: none"> <li>– основные принципы и определения;</li> <li>– статистический контроль по качественным и количественным показателям;</li> <li>– законы распределения случайных величин.</li> </ul>
Для успешного овладения материалом УЭ-1 следует изучить материалы УМК.
УЭ-2. Сертификация – основа управления качеством продукции
Учебные цели УЭ-2
Студент должен знать:
<ul style="list-style-type: none"> <li>– основные положения обязательной и добровольной сертификации;</li> <li>– схемы сертификации и условия их применения;</li> <li>– порядок проведения работ по сертификации;</li> <li>– национальная система сертификации.</li> </ul>
Для успешного овладения материалом УЭ-2 следует изучить материалы УМК.
УЭ-К. Выходной контроль по модулю
После изучения данного модуля студент должен проверить свои знания.
<b>Модуль 4</b> <b>Лабораторные занятия</b>

Выходной контроль по модулю – защита лабораторных работ.



## ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

### Глава 1. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЭС

Все факторы, воздействующие на РЭС, могут быть классифицированы по содержанию и сущности их влияния на РЭС на две большие группы – субъективные факторы и объективные факторы (рис 1.1).

#### *Субъективные факторы*

Субъективные факторы определяют влияние человеческого фактора на качество решений при схемотехнической и конструкторско-технологической разработке РЭС, качество проведения технологических процессов, качество организации производства. Как известно, по мере усложнения конструкций РЭС и повышения сложности технологии производства человеческий фактор все острее проявляется на всех этапах разработки, производства и эксплуатации РЭС.

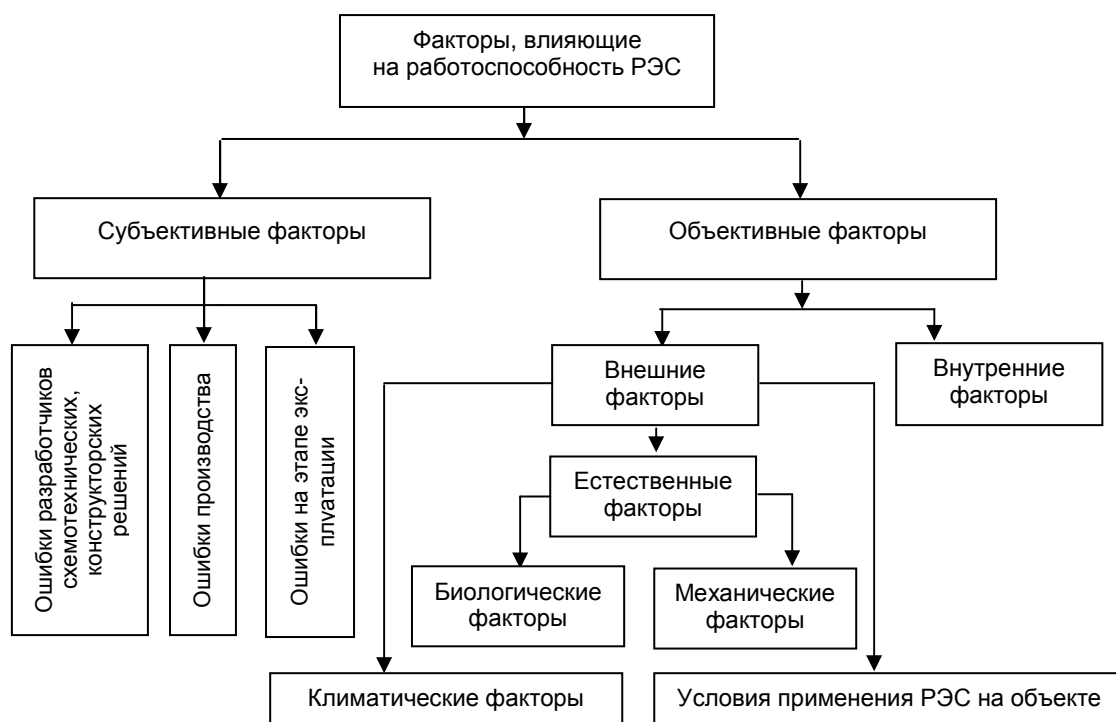


Рис. 1.1. Классификация факторов, влияющих на РЭС

Влияние человеческого фактора как комплекса субъективных факторов проявляется в ошибках разработчиков РЭС, ошибках производственного персонала при выполнении технологических процессов, ошибках операторов в ходе эксплуатации РЭС.

В процессе проектирования спецтехнологического оборудования, решения задач технологической подготовки производства, в частности, при организации рабочих мест для реализации технологических процессов необходимо учитывать антропометрические данные, биомеханические особенности и психофизиологические возможности производственного персонала, что позволит обеспечить безопасность, удобство и оперативность выполнения технологических операций, а значит, создаст основу для выпуска качественной продукции.

Таким образом, с точки зрения воздействия глобального субъективного человеческого фактора можно определить:

- субъективные схемотехнические, конструкторско-технологические проявления человеческого фактора, вызывающие ошибки проектирования;

- ошибки в выборе конструкционных материалов, конструктивных и компоновочных решений и т.д.;

- ошибки производства – дефекты обработки, сборки (сварки, пайки, ошибки электрического монтажа и т.п.), регулировки и настройки сборочных единиц и деталей РЭС и т.п., происходящие по вине рабочих цехов основного производства (сборщиков, операторов-монтажников, регулировщиков, контролеров и т.п.) Подобные ошибки проявляются чаще всего в случае недостаточного учета биомеханических и психофизиологических особенностей организации рабочих мест и производства в целом.

Количество ошибок, допущенных при проектировании и в ходе производства, может служить мерой надежности выпускаемых изделий.

Ошибки операторов на этапе эксплуатации РЭС могут в целом приводить РЭС к выходу из строя (из-за собственно ошибок операторов или ошибок в организации эксплуатационного обслуживания).

Субъективные факторы, действующие на этом этапе, по сути, проявляются в ошибочных действиях обслуживающего персонала. Обслуживающий персонал должен обеспечить выполнение требований ТУ, регламентирующих допустимые нормы на воздействующие факторы.

### ***Объективные факторы***

Объективные факторы, воздействующие на РЭС, можно классифицировать по источнику их возникновения и особенностям действия на внутренние и внешние.

**Внутренние воздействия** обусловлены режимами эксплуатации РЭС, характеризующимися электрическими нагрузками на элементы и цепи, формирующие и преобразующие электрический сигнал; механическими нагрузками на элементы конструкции и элементы преобразования сигнала и т.п.

**Внешние воздействия** характеризуют условия хранения, транспортировки и эксплуатации РЭС. По природе возникновения они подразделяются на воздействия естественных природных факторов (климатических, биологических, механических), обусловленных состоянием окружающей среды, и на воздействие условий применения РЭС на объекте (в системе).

Под условиями применения РЭС на объекте (в системе) понимают воздействия, связанные с условиями функционирования объекта, в составе которого находится РЭС (подводная лодка, самолет, космический корабль и т.д.) в условиях эксплуатации.

Это могут быть механические воздействия, воздействия тепла, давления, электромагнитных полей, радиационных излучений искусственной природы.

**Внутренние воздействия на РЭС** проявляются в виде электрических и механических нагрузок, возникающих в процессе функционирования аппаратуры. Электрические нагрузки обусловлены необходимостью формирования и преобразования электрических сигналов в цепях РЭС, подачи питающих напряжений, обеспечивающих нормальную работу комплектующих изделий.

Электрические нагрузки вызывают в РЭС тепловые, электрические и электрохимические процессы. В первом случае на элементы РЭС влияет температура и скорость ее изменения; во втором случае изменения в элементах возникают вследствие электронно-ионного взаимодействия; в третьем случае изменения связаны с процессами электродиффузии.

За счет тепла, выделяемого в комплектующих элементах и сборочных единицах, температура блоков может достигать 100 °С и более, а температура некоторых элементов может быть еще более высокой. Существенными являются изменения температуры при включении и выключении РЭС. Для наземных средств, эксплуатируемых в дежурном режиме, изменение температуры в блоках достигает 50 °С и более за время, равное времени установления теплового равновесия блока с окружающей средой. Это время колеблется от 10 мин до 3 ч (зависит от объема и массы блоков). Например, для бортового авиационного оборудования температура при включении нагрузки может достигать 80 °С при скорости ее роста (снижения) 50 °С в минуту.

Механические нагрузки связаны с использованием в РЭС разнообразных коммутационных изделий, электромеханических изделий, устройств управления кинематикой, сложных приборных конструктивов (редукторов, телескопических направляющих и т.п.).

**Внешние воздействия на РЭС** имеют разную физическую природу и изменяются в широких пределах. Они подразделяются на климатические и механические.

*Климатические воздействия* по физической природе подразделяются:

- на температурные воздействия (кратковременные и длительные);
- на воздействия влаги (кратковременные и длительные);
- на воздействия соляного тумана;
- на воздействия атмосферного давления;
- на воздействия солнечной радиации;
- на воздействия пыли;
- на воздействия плесневых грибков.

Механические воздействия на РЭС по характеру физической природы можно подразделить:

- на вибрации, которые вызывают ускорения;
- на удары, т.е. механические нагрузки и деформацию конструкции.

Вибрации подразделяются на кратковременные и длительные, удары – на линейные и центробежные.

Говоря о критичности влияния внешних воздействий на РЭС, можно среди всех внешних воздействий выявить:

- воздействия, вызывающие обратимые (ненакапливающиеся) изменения;
- воздействия, вызывающие обратимые отказы;
- воздействия, вызывающие непосредственные накапливающиеся разрушения;
- воздействия, вызывающие необратимые накапливающиеся изменения;
- воздействия, вызывающие необратимые отказы.

Указанные выше климатические внешние воздействия являются объективными факторами – условиями, в которых осуществляется эксплуатация, хранение и транспортировка РЭС.

Объективные факторы целесообразно подразделять на прямые и косвенные.

**К прямым факторам относятся факторы**, являющиеся природными, естественными особенностями окружающей среды (климатические, биологические, радиационные и т.п.)

**К косвенным факторам относятся факторы**, возникающие и воздействующие на РЭС в условиях эксплуатации.

Нормальными климатическими условиями для РЭС являются: температура  $+25 \dots +10$  °С, относительная влажность – 45 – 80 %, атмосферное давление –  $(8,3 - 10,6) \cdot 10^4$  Па (630 – 800 мм рт. ст.) и отсутствие активных веществ в окружающей атмосфере.

При разработке РЭС необходимо, таким образом, учитывать те или иные климатические условия среды, с тем чтобы создавать РЭС в том или другом климатическом исполнении. При разработке РЭС учитывают нижеперечисленные особенности регионов по климатическим условиям.

**Очень холодный регион (ОХЛ)** – располагается в Антарктиде.

Средняя минимальная температура в нем ниже 60 °С. Характерной особенностью этого региона является сочетание низких температур с сильным ветром.

**Холодный регион (ХЛ)** – территория, на которой минимум температуры воздуха не ниже 60 °С. Характерной особенностью является обледенение, иней, ветер с мелкой снежной пылью.

**Умеренно холодный регион (УХЛ)** – территория, на которой максимум температуры воздуха не выше +40 °С, а минимум – не ниже +60 °С, образование инея, выпадение росы, наличие тумана, изменение давления воздуха от 86 до 106 кПа.

**Тропически влажный регион (ТВ)** – территория, на которой температура воздуха не выше + 45 °С, а относительная влажность – не менее 80 % при + 27 °С. Высокая влажность и повышенная концентрация солей (особенно вблизи побережья морей и океанов) делают атмосферу этой зоны коррозионно-агрессивной. Сочетание температуры и влажности в таких регионах способствует существованию 10000 видов плесневых грибов.

**Тропически сухой регион (ТС)** – территория, на которой температура воздуха выше +45 °С и которая не относится к району с ТВ-климатом. Интенсивное солнечное излучение (до 1500 Вт/м<sup>2</sup>), значительное изменение температуры воздуха в течение суток, пыль и песок способствуют отрицательному абразивному и химическому воздействию на РЭС.

Умеренно холодная морская зона включает моря, океаны и прибрежные территории, расположенные севернее 30° северной широты и

южнее 30° южной широты. Остальная часть морей, океанов и прибрежных территорий относится к **тропически морской зоне (ТМ)**.

Климат морских зон отличается наличием высокой влажности и значительным содержанием хлоридов в атмосфере. РЭС, предназначенные для эксплуатации в одном из указанных климатических районов, изготавливают в определенном климатическом исполнении (табл. 1.1).

Характеристики климатических районов приведены в ГОСТ 24482-80, который позволяет установить технические требования к РЭС по стойкости к климатическим факторам, режимы их испытаний, правила эксплуатации, хранения и транспортирования.

Таблица 1.1

**Обозначения РЭС по климатическому исполнению**

Условия эксплуатации РЭС	Обозначение РЭС	
	буквенное	цифровое
На суше, в реках, озерах в макроклиматических районах:		
– с умеренным климатом	У	0
– с умеренным и холодным климатом	УХЛ	1
– с влажным тропическим климатом	ТВ	2
– с сухим тропическим климатом	тс	3
– с сухим и влажным тропическим климатом	т	4
Во всех макроклиматических районах на суше, кроме района с очень холодным климатом (общеклиматическое исполнение)	О	5
В макроклиматических районах с морским климатом:		
– умеренно холодным	м	6
– тропическим, в том числе для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в этом районе	ТМ	7
С умеренно холодным и тропическим, в том числе для судов неограниченного района плавания	ОМ	8
Во всех макроклиматических районах на суше и на море, кроме района с очень холодным климатом (климатическое исполнение)	В	9

Для различных зон эксплуатации характерны различные сочетания и длительность воздействующих факторов – под влиянием этих факторов в РЭС протекают сложные физико-химические процессы, изменяющие их

свойства и вызывающие отказы. Поэтому необходимо иметь максимум информации об изменениях характеристик изделий при воздействии на них климатических факторов, и в первую очередь – о допустимых величинах воздействующих факторов.

В табл. 1.2 приведены допустимые значения естественных климатических факторов, воздействующих на РЭС. Учитывая влияние естественных климатических условий и управляя искусственными, можно добиться надежной работы РЭС.

В табл. 1.3 приведены основные эффекты, вызываемые в РЭС воздействием отдельных внешних климатических факторов.

Особо необходимо рассмотреть воздействие на РЭС биологических факторов, как одного из видов климатического воздействия.

Большинство биоповреждений РЭС обусловлено воздействием микроорганизмов и плесневых грибов (микроорганизмом называют любой организм, имеющий микроскопические размеры и невидимый невооруженным глазом).

Можно выделить четыре вида биоповреждений:

- механические макроразрушения при контакте;
- ухудшение эксплуатационных параметров;
- биохимическое разрушение;
- физико-химическая коррозия на границе материал – организм

(рис. 1.2).

*Механические разрушения* вызываются в основном микроорганизмами, а также организмами, имеющими размеры, сравнимые с габаритами изделия.

Микроразрушение при контакте может произойти из-за столкновения, прогрызания и уничтожения (примерами являются столкновения птиц с антеннами радиолокационных станций, уничтожение материалов и изделий РЭС происходит в процессе питания организмов); нарушение материалов и изделий РЭС из-за действий грызунов (крыс, мышей, зайцев, белок, кротов и т.д.), а также различных насекомых (термитов, муравьев, жуков и т.д.).

Биозагрязнение и биозасорение вызывают ухудшение эксплуатационных параметров РЭС. Биозагрязнением называют остатки выделений животных (насекомых) и продуктов их жизнедеятельности, которые в дальнейшем, впитывая влагу из воздуха, изменяют параметры изделий.

Таблица 1.2

## Допустимые значения естественных климатических факторов, воздействующих на РЭС

Вид воздействия	Климат в зоне эксплуата. и категории размещения изделий											
	Умеренный				Холодный				Тропический			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Температура воздуха, °С, верхнее значение	+40	+40	+40	+35	+40	+40	+40	+35	+45	+45	+45	+45
	-40	-40	-40	+1	-60	-60	-60	+1	-10	-10	-10	-10
Сочетание относительной влажности воздуха, %, с температурой, °С,	100/25	100/25	98/25	80/25	100/25	100/25	98/25	80/25	100/35	100/35	98/35	98/35
	Интегральная плотность потока солнечной радиа- ции, Вт/м <sup>2</sup> ,	1125	-	-	1125	-	-	-	1125	-	-	-
Максимально возможная температура нагрева чер- ной матовой поверхности, °С	+80	-	-	-	+80	-	-	-	+90	-	-	-
	+40	+30	+30	-	+40	+30	+30	-	+40	+30	+30	-
Колебания температуры воздуха за 8 ч, °С Интен- сивность дождя, мм/мин <sup>-1</sup>	3	-	-	-	3	-	-	-	5	-	-	-
	верхнее значение Динами- ческое воздействие пыли и песка	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Выпадение инея Наличие плесени грибков Наличие морской соли в воздухе, мг/(м <sup>3</sup> в сут): верхнее значение	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	X	-
	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+
верхнее значение	2	2	2	-	2	2	-	-	2	2	-	-



Вид воздействия	Климат в зоне эксплуатации и категории размещения изделий												
	На суше						На суше и море						
	1	2	3	4	1	2	3	4					
Температура воздуха, С,	+45	+45	+45	+45	+45	+45	+45	+45	+45	+45	+45	+45	+45
верхнее значение	-60	-60	-60	+1	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-60	-10
нижнее значение	100/35	100/35	98/35	98/35	100/35	100/35	100/35	100/35	100/35	98/35	98/35	98/35	98/35
Сочетание относительной влажности воздуха, %, с температурой, С,	1125	-	-	-	1125	-	-	-	-	-	-	-	-
верхнее значение	Максимально возможная температура нагрева черной матовой поверхности, °С	+90	-	-	+90	-	-	-	-	-	-	-	-
Интегральная плотность потока солнечной радиации, Вт/м <sup>2</sup> ,	+40	+30	+20	-	+40	+30	+20	-	+40	+30	+20	-	-
верхнее значение	Интенсивность дождя, мм/мин <sup>-1</sup> ,	5	-	-	5	-	-	-	5	-	-	-	-
Динамическое воздействие пыли и песка	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-
Выпадение инея	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-
Наличие плесени грибков	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+
Наличие морской соли в воздухе, мг/(м <sup>2</sup> в сут),	2	+	+	+	+	+	X	-	+	+	X	+	+
верхнее значение	2	2	-	-	2000	2000	-	-	2000	2000	-	-	-

Обозначения: 1 – элементы междублочного монтажа РЭС, размещаемые на открытом воздухе; 2 – элементы междублочного монтажа РЭС, размещаемые под навесом, и внутриблочного монтажа РЭС, размещаемые на открытом воздухе; 3 – изделия РЭС, размещаемые в помещениях без искусственного регулирования климатических условий; 4 – изделия РЭС, размещаемые в помещениях с искусственным регулированием климатических условий; «+» – фактор присутствует; «-» – фактор отсутствует; «X» – фактор может иметь место.

**Основные эффекты, вызываемые в РЭС воздействием  
отдельных внешних климатических факторов**

Факторы окружающей среды	Основной эффект воздействия	Типичный вид отказов
1	2	3
Высокая температура Низкая температура Высокая относительная влажность	Тепловое старение – окисление, растрескивание, химическая реакция. Размягчение, плавление, сублимация. Уменьшение вязкости, испарение. Расширение. Хрупкость. Образование льда. Увеличение вязкости и затвердевание. Потеря механической прочности. Физическое сжатие. Абсорбция или адсорбция влаги. Набухание. Потеря механической прочности. Химическая реакция – коррозия, электролиз. Увеличение проводимости изоляторов	Нарушение изоляции, механическое повреждение, увеличение механического напряжения, увеличивающийся износ подвижных частей из-за расширения или потери смазки. Нарушение изоляции, растрескивание, механическое повреждение, увеличивающийся износ подвижных частей, вызванный сжатием или потерей механической прочности или потерей смазки. Физические разрушения, нарушения изоляции, механическое повреждение
Низкая относительная влажность	Обезвоживание. Хрупкость. Потеря механической прочности. Усадка. Увеличение абразивного износа между подвижными контактами	Механические повреждения. Растрескивание
Высокое давление	Сжатие, деформация. Расширение. Снижение электрической прочности воздуха	Механическое повреждение, течи (нарушение герметичности)
Низкое давление	Образование «короны» и озона. Ухудшение условий охлаждения	Механическое повреждение, течи (нарушение герметичности), искрение, перегрев
Солнечная радиация	Химическая, физическая и фотохимическая реакции. Поверхностные разрушения. Хрупкость. Образование озона. Нагрев. Различные тепловые и механические повреждения	Нарушение изоляции
Песок и пыль	Абразивный износ и эрозия. Застревание. Засорение. Термоизоляция. Электростатические эффекты	Увеличенный износ, электрическое повреждение, механическое повреждение

1	2	3
Коррозионная атмосфера	Химические реакции, коррозия, электролиз	Увеличенный износ, электрическое повреждение, механическое повреждение
Ветер	Применение силы. Усталостное явление. Выветривание материалов. Засорение. Эрозия. Наведение вибрации	Структурное разрушение, механическое повреждение
Дождь	Абсорбция воды. Термический удар. Эрозия. Коррозия.	Электрическое повреждение, растрескивание, течи, поверхностное разрушение
Град	Эрозия. Термический удар. Механическая деформация	Структурное разрушение, поверхностное разрушение
Снег или лед	Абсорбция воды. Термический удар	Структурное разрушение
Быстрая смена температуры	Тепловой удар. Тепловое напряжение	Механическое повреждение, растрескивание, нарушение герметичности
Озон	Быстрое окисление. Хрупкость (особенно резины). Снижение <b>электрической прочности воздуха</b>	Электрическое повреждение, механическое повреждение, потускнение поверхности, растрескивание
Ускорение (постоянный режим)	Механическое напряжение. Усталостное явление	Механическое повреждение, увеличение износа подвижных частей, структурное разрушение

Биозасорение РЭС связано с наличием спор грибов и бактерий, семян растений.

*Биохимические разрушения* являются наиболее распространенными видами биоповреждений и вызываются в основном микроорганизмами и плесневыми грибами. Этот вид разрушения разделяют на два характерных типа – биологическое потребление в процессе питания и химическое действие выделяющихся в процессе питания веществ. Биологическое потребление связано с предварительным химическим разрушением ферментом исходного материала иногда только одного компонента, обычно низкомолекулярного соединения, например, пластификатора, стабилизатора и т.д.

Такое разрушение открывает путь физико-химической коррозии, приводит к ухудшению термодинамических свойств материала и его механическому разрушению под действием эксплуатационных нагрузок. Химическое действие продуктов обмена веществ сводится к агрессивному воздействию на материалы органических кислот. Физико-химическая коррозия на границе материал – организм вызывается воздействием амино- и органических кислот, а также продуктов гидролиза. В основе этого биоповреждения лежат электрохимические процессы коррозии металлов.

На рис. 1.2 указаны биологические повреждения, возникающие в РЭС.

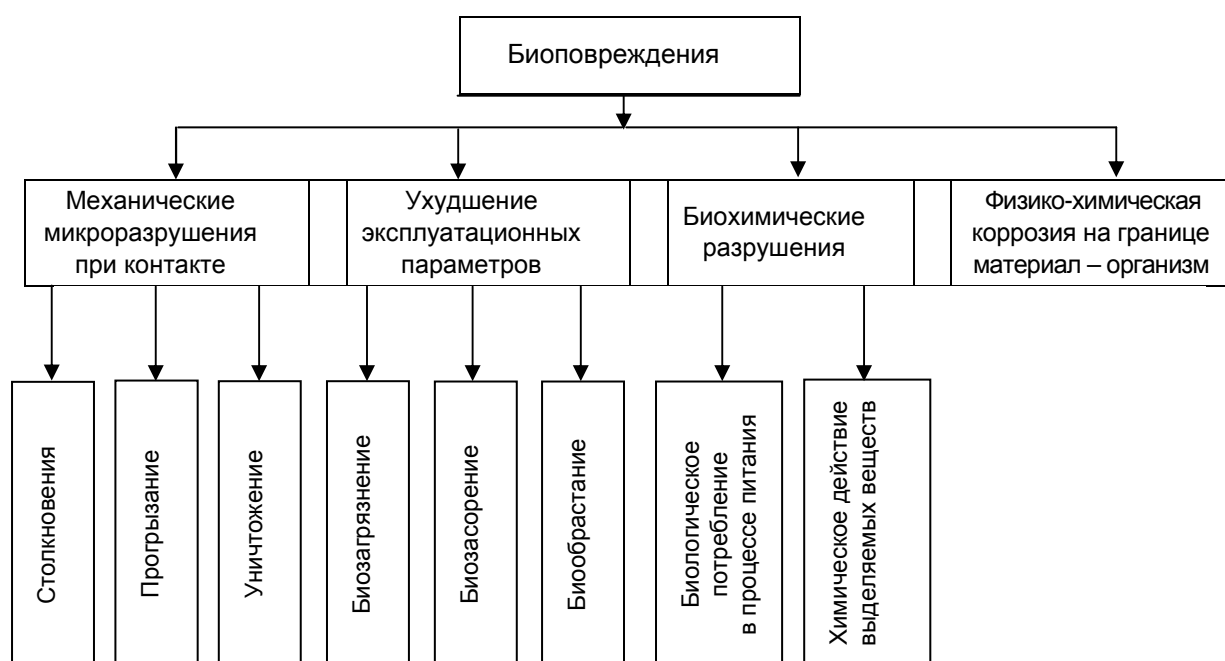


Рис. 1.2. Биологические повреждения, возникающие в РЭС

### Механические факторы

Как мы уже отмечали, в зависимости от своего назначения РЭС может подвергаться различным механическим воздействиям. Основными механическими воздействиями являются вибрации, удары, линейные и угловые ускорения.

Свойство РЭС противостоять влиянию вибрации характеризуется виброустойчивостью и вибропрочностью.

*Виброустойчивость* определяет способность РЭС выполнять заданные функции во включенном состоянии в условиях воздействия вибраций.

*Вибропрочность* характеризует качество конструкции РЭС, ее способность противостоять разрушающему воздействию вибрации в нерабочем состоянии и продолжать нормально работать после снятия вибрационных нагрузок. Воздействие вибраций на конструкцию РЭС характеризуется диапазоном частот и величиной ускорения (в единицах  $g$ ).

Удар возникает в тех случаях, когда объект, на котором установлена РЭС, претерпевает быстрое изменение ускорения. *Удар* характеризуется ускорением, длительностью и числом ударных импульсов.

Различают однократные и многократные удары. Линейные ускорения характеризуются величиной ускорения (в единицах  $g$ ) и длительностью воздействия. Акустические шумы проявляются в РЭС, устанавливаемых на ракетах, самолетах, кораблях, на наземных транспортных средствах, они характеризуются давлением звука, мощностью колебаний источника звука, силой звука, спектром звуковых частот. Требования к устойчивости конструкции РЭС к воздействию механических факторов постоянно ужесточаются. Это иллюстрируется данными табл. 1.4.

Таблица 1.4

**Ужесточение требований к РЭС по механическим воздействиям**

Механические воздействия	Уровень требований			
	1965 г.	1970 г.	1995 г.	2000 г.
1. Вибрации: частота, Гц/ускорение, $g$	$5\sum 1000$	$5\sum 2500$	$5\sum 5000$	$5\sum 10000$
2. Линейное ускорение, $g$	75	150	500	800
3. Однократные удары, $g$	150	500	1000	2000
4. Многократные удары, $g$	75	150	150	200
5. Акустические шумы, дБ	–	–	165	180

## Глава 2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИСПЫТАНИЙ РЭС

Испытания – экспериментальное определение количественных и качественных характеристик параметров изделия путем воздействия на него или его модель спланированного комплекса внешних возмущающих факторов (ВВФ).

Очевидно, что такие испытания являются важной экспериментальной основой функционирования систем управления качеством, рассмотренных нами в главе 1.

Как показано в главе 1, под ВВФ понимают явления, процессы или среды, внешние по отношению к изделию или его составным частям, которые вызывают или могут вызвать ограничение или потерю работоспособности изделия в процессе эксплуатации.

Основными целями испытаний РЭС являются:

1. Экспериментальное подтверждение теоретических расчетов, принятых допущений и гипотез, заданных показателей качества РЭС в условиях, близких к эксплуатационным, а также получение оценок, позволяющих определить резервы повышения качества конструкторско-технологических решений и резервы надежности разработанных изделий.

2. Контроль качества технологии и организации производства, соблюдения в производстве и эксплуатации требований технической и технологической документации.

3. Устранение дефектов взаимодействия изделий в составе комплексов (систем) РЭС.

Выделяют три группы задач, решаемых в ходе проведения испытаний:

- получение эмпирических данных, необходимых для проектирования РЭС;
- установление соответствия изделия тактико-техническим требованиям;
- определение предельных состояний РЭС в процессе эксплуатации.

Цели испытаний не постоянны – они могут меняться на различных этапах проектирования, производства и эксплуатации.

Таким образом, проведение испытаний направлено на выявление:

- недостатков конструкции и технологии изготовления РЭС, которые не позволяют изделию качественно и надежно выполнять целевые функции в условиях эксплуатации;
- отклонений от конструкции или технологии, допущенных производством;

- скрытых случайных дефектов материалов комплектующих изделий, не поддающихся обнаружению при существующих методах технического контроля;

- резервов повышения качества и надежности конструктивно-технологического решения изделия.

Результаты испытаний, а именно – количественные показатели уровня качества и надежности изделий используются при разработке РЭС, в которых эти изделия будут функционировать. Одновременно разработчики РЭС по результатам испытаний изделий в производстве выявляют отступления от конструкторской или технологической документации, допущенные в процессе производства, устанавливают причины снижения требуемого уровня качества и т.п. Если причина снижения качества оказывается неустановленной, принимаются необходимые меры по совершенствованию средств и методов технического контроля продукции или в целом технологического процесса.

Для повышения качества и надежности выпускаемых изделий разрабатывают специальные виды и методы испытаний, в том числе и обеспечивающие выявление изделий со скрытыми дефектами, вызывающими появление ранних отказов в РЭС. Такие испытания называются тренировками (термотоксовая тренировка, электротренировка, тренировка термоциклами и т.д.). Режимы тренировок выбирают такими, чтобы они не вырабатывали ресурса образцов, не содержащих дефектов, вызывающих отказы при эксплуатации.

Указанные цели и задачи испытаний являются общими для любого вида РЭС. В то же время программы и методы проведения испытаний определяются конкретным видом изделия, его целевым назначением, условиями эксплуатации. Значение испытаний РЭС возрастает с увеличением степени интеграции и плотности компоновки изделий.

### **Классификация видов, методов и технологии испытаний**

В реальных условиях эксплуатации на РЭС воздействует сложный комплекс разнообразных факторов окружающей среды как естественного (природного), так и искусственного происхождения.

Для оценки надежности и качества РЭС в производстве предусматриваются следующие виды испытаний РЭС с точки зрения внешних воздействующих факторов:

- испытания на климатические воздействия;
- испытания на биологические воздействия;
- испытания на механические воздействия;
- испытания на радиационные и специальные виды воздействий.

Наибольшее разнообразие по характеру воздействий и сложность в организации постановки производственных испытаний представляют собой испытания на климатические и биологические воздействия.

Выделяют следующие виды климатических испытаний:

- испытание на повышенную температуру;
- испытание на пониженную температуру;
- испытание на изменение температур;
- испытание на воздействие инея и росы;
- испытание на воздействие повышенной влажности воздуха;
- испытание на воздействие солнечного излучения;
- испытание на воздействие пыли;
- испытание на воздействие атмосферного давления;
- испытание на воздействие повышенного гидростатического давления;
- испытание на воздействие соляного тумана;
- испытание на внешнее воздействие воды;
- испытание на ветроустойчивость;
- испытание на герметичность;
- испытание на биологические воздействия.

Не меньшее значение имеют и испытания РЭС на механические воздействия. Проводят следующие виды испытаний на механические воздействия:

- испытание на определение наличия и отсутствия резонансных частот конструкций;
- испытание на виброустойчивость и вибропрочность;
- испытание на ударную прочность и устойчивость;
- испытание на воздействие линейных нагрузок;
- испытание на воздействие акустического шума.

Особый вид для РЭС космического применения представляют собой радиационные и специальные виды космических испытаний.

Все указанные виды испытаний могут быть классифицированы по условиям, месту, технологии и организации проведения на две большие группы – физические (натурные) испытания РЭС (или их опытных и макетных образцов); испытания с использованием моделей.

**Физические испытания** подразделяются: на лабораторные; на стендовые; на полигонные; на натурные; на эксплуатационные.

**Испытания с использованием моделей** осуществляются методами физического и математического моделирования. Применение этих методов позволяет отказаться от ряда сложных физических испытаний образцов реальных РЭС или их макетов.



По целям и назначению испытания подразделяются: на исследовательские; на контрольные; на сравнительные; на определительные (определяющие испытания проводят для определения значений характеристик РЭС с заданными показателями точности, достоверности и надежности).

**По месту испытаний в комплексном процессе проектирования** испытания бывают: доводочные; предварительные; приемочные.

**По месту и функциям в серийном производстве:** квалификационные; предъявительские; приемо-сдаточные; периодические; инспекционные; типовые; аттестационные; сертификационные.

**По организационному уровню проведения:** государственные; межведомственные; ведомственные.

**По продолжительности проведения:** нормальные; ускоренные; сокращенные.

**В зависимости от вида воздействия:** механические испытания; климатические испытания (воздействие влажности, смены температур, солнечного излучения и т.д.); биологические испытания; радиационные испытания; электромагнитные испытания; на воздействие специальных сред (неорганические и органические соединения, масла, смазки, растворители, топлива, рабочие растворы и т.д.); термические испытания (воздействие теплового удара, нагрева, светового излучения, взрыва, аэродинамического нагрева, теплового потока, пламени, трения).

**По целевому результату воздействия испытаний** на состояние изделия: неразрушающие испытания; разрушающие испытания; испытания на прочность; испытания на устойчивость.

**По характеру укрупненного определения параметров РЭС:** функциональные (параметрические) испытания; испытания на надежность; испытания на транспортабельность; граничные испытания; технологические испытания.

### **Общие принципы проведения испытаний РЭС**

В настоящее время в лабораторных и стендовых испытаниях применяются следующие способы проведения испытаний: последовательный; параллельный; последовательно-параллельный; комбинированный.

При последовательном способе один и тот же объект испытания последовательно подвергается всем предусмотренным программой видам испытаний. Эти испытания, как правило, проводятся на различных выборках. Последовательность испытаний предусматривает обычно первоочередное выявление наиболее грубых дефектов аппаратуры, таких как наличие коротких замыканий и обрывов при проведении, например, приемо-сдаточных испытаний.

Важным условием проведения последовательных испытаний является соблюдение определенного порядка воздействия внешних факторов. Иногда при составлении программы предусматривают такую последовательность применения внешних воздействующих факторов на объект, при которой вначале действуют наиболее сильно влияющие на данный объект внешние факторы.

Это делается для скорейшего выявления потенциально ненадежных образцов с целью сокращения времени испытаний. Однако при этом теряется большая часть информации о влиянии других факторов, которая могла бы быть получена при их воздействии. Поэтому чаще на практике рекомендуется начинать испытания с воздействия на РЭС наименее жестких факторов, при которых воздействие будет наименьшим. Такой способ испытаний позволяет точнее определить причины отказов и составить более полную картину о наличии в РЭС потенциальных дефектов. С другой стороны, если наиболее опасные для объекта внешние воздействующие факторы расположить в конце последовательных испытаний, то значительно увеличивается время их проведения.

Оптимальная последовательность проведения испытаний зависит от назначения РЭС, места их установки и предполагаемых условий эксплуатации. Поэтому последовательность проведения испытаний для конкретного РЭС указывается в ТУ или программе испытаний. В то же время рекомендуется, например, перед проверкой герметичности и влагоустойчивости РЭС проводить механические испытания, способные вызвать разгерметизацию аппаратуры.

В этом смысле все климатические испытания целесообразно проводить после механических испытаний. Характерной особенностью последовательного способа проведения испытаний является наличие эффекта накопления деградационных изменений физической структуры объекта испытаний по мере перехода от одного вида внешнего воздействующего фактора к другому, в результате чего каждое воздействие предыдущего фактора оказывает влияние на результаты испытаний при воздействии последующего, что, в свою очередь, усложняет интерпретацию результатов испытаний и увеличивает износ РЭС.

При параллельном способе проведения испытаний образец подвергается одновременному воздействию различных внешних воздействующих факторов одновременно (параллельно) на нескольких выборках. Такой способ позволяет получить большой объем информации за значительно более короткий промежуток времени, чем при последовательном способе,

при минимальном износе испытываемых образцов. Однако параллельный способ требует существенно большего числа испытываемых изделий, чем последовательный.

Компромиссным между последовательным и параллельным способами проведения испытаний является последовательно-параллельный способ, позволяющий в каждом конкретном случае более эффективно использовать преимущества того или иного способа и находить наиболее оптимальные варианты их сочетания. При последовательно-параллельном способе все изделия, отобранные для испытаний, разбиваются на несколько групп, которые испытываются параллельно. В каждой из групп испытания проводят последовательным способом. В данном случае все виды испытаний должны быть разбиты также на группы, число которых равно числу групп испытываемых изделий. По своему составу группы испытаний формируются по видам испытаний из тех соображений, чтобы, с одной стороны, продолжительность испытаний во всех группах была примерно одинаковой, а с другой – чтобы условия проведения объединенных в одну группу видов испытаний были близки к реальным. Одним из примеров возможной разбивки видов испытаний на группы и последовательность их проведения в каждой группе **приведены в табл.**

С целью приближения лабораторных условий испытаний объекта к реальным условиям его эксплуатации все большее распространение начинает получать комбинированный способ испытаний, при котором на объект испытания одновременно воздействуют несколько внешних факторов. Так, для имитации условий вибрации объекта в космическом пространстве используют лабораторные испытания на вибрацию при одновременном воздействии на объект низкой температуры и вакуума.

### **Планирование испытаний**

В результате испытаний получают данные о качестве РЭС как на стадии проектирования, так и на последующих стадиях и этапах их создания. Поэтому испытания являются составной частью общей программы работ по проектированию и производству новых изделий РЭС. Поскольку в разработке нового изделия РЭС участвуют многие подразделения НИИ и опытных заводов, то существует общий план, увязывающий деятельность каждого подразделения. Для целенаправленных и согласованных действий подразделений и отдельных исполнителей на всех этапах создания РЭС (от составления технических требований на проектирование изделий до контроля его качества при эксплуатации) формируется программа обеспечения качества (ПОК). Существенная роль в этой программе отводится испытаниям.

Анализируя перечень работ, предусматриваемых программой обеспечения качества, можно отметить следующее:

1. Выполнение программы должно обеспечить руководителей и исполнителей наиболее важной информацией для принятия решений и проведения мероприятий по преодолению существующих и возникающих трудностей реализации проекта.

2. Особая роль в программе отведена испытаниям, проводимым на ранних этапах создания РЭС. Информация, получаемая на этих испытаниях, является технической основой совершенствования и оптимизации конструктивно-технологических решений РЭС.

3. Обеспечение качества РЭС на этапе производства достигается не только контролем технологического процесса и проведением технологических тренировок, но и испытанием продукции.

4. Контрольные операции технологии и продукции, проведение испытаний существенно повышают стоимость изготовления изделия.

При разработке программ испытаний должны учитываться цели и задачи обеспечения качества разрабатываемых и изготавливаемых РЭС с учетом затрат на проведение испытаний. Испытания должны быть оптимизированы по эффекту от использования получаемой информации и по затратам на их проведение.

Очевидно, испытания – не единственный метод получения информации, необходимой для управления качеством проектируемой и изготавливаемой РЭС. Испытания могут быть заменены контролем процесса проектирования и технологических процессов изготовления изделий. Опыт показывает, что усиление эффективности контроля процесса проектирования и технологических процессов изготавливаемой продукции приводит к снижению роли испытаний изготавливаемой продукции. В отдельных случаях удается заменить приемо-сдаточные испытания введением автоматизированных систем контроля технологических процессов изготовления изделий. Поэтому, учитывая необходимость оптимизации проектируемой и изготавливаемой РЭС по ее стоимости, следует находить разумный компромисс между объектами испытаний, контроля проектирования и контроля технологического процесса изготовления изделий.

Особое место должно уделяться организации проведения испытаний. Кроме программы обеспечения качества изделия, определяющей ответственных за испытания, составляется программа по каждому виду испытаний и комплексная программа испытаний. Как правило, разработчик проекта определяет объекты и цели испытаний, служба управления качеством следит за соответствием программы, установленной в технической доку-

ментации, нормам испытаний и методике их проведения. Отделы надежности и испытаний, входящие в службу управления качеством, устанавливают требования к объему и методике испытаний, согласовывают режимы испытаний исходя из реальных возможностей испытательного оборудования.

Подразделения производства контролируют своевременное изготовление образцов, соответствующих требованиям НТД.

### **Выбор объектов испытаний**

Объектами испытаний могут являться макеты, модели, экспериментальные образцы изделий, изготовленные при выполнении научно-исследовательских работ (НИР) на этапах проектирования; опытные образцы изделий, изготовленные при выполнении опытно-конструкторских работ (ОКР); образцы, изготовленные при внедрении или освоении изделия в производстве; образцы, изготовленные в ходе установившегося серийного или массового производства.

Испытаниям подвергаются изделия, соответствующие НТД по конструкции, внешнему виду, а также параметрам, определяемым при нормальных климатических условиях. Изделия необходимо испытывать в том виде и состоянии, в котором они реально эксплуатируются. Если составные части изделия при монтаже, транспортировке и эксплуатации находятся в неодинаковых условиях, их можно испытывать отдельно в соответствии с условиями эксплуатации каждой части. В этом случае допускается также проводить испытания изделия в целом, но по программе, учитывающей условия эксплуатации.

Если массогабаритные характеристики изделия не позволяют испытывать его в условиях лаборатории, то необходимую информацию о работоспособности и сохранности внешнего вида после воздействия объективных факторов получают по результатам анализа испытания составных частей изделия.

Если конструктивно изделие не может быть разделено на составные части, то испытания (отдельные виды испытаний) следует проводить по программе, учитывающей реальные условия эксплуатации при требуемых значениях воздействующих факторов. Допускается в этом случае испытывать также макеты, если конструкция и технология изготовления макетов обеспечивают их подобие реальному изделию.

При испытании изделия по составным частям крепление их на стендах должно выполняться аналогично креплению их в реальной структуре конструкции изделия. При этом должно быть учтено влияние (тепловое,

механическое) составных частей изделия. Степень соответствия результатов испытания составных частей изделия или макетов результатам испытания реального изделия зависит от цели испытания, характера и достоверности информации об изделии.

В зависимости от вида и этапа разработки РЭС объектом испытания может являться единичное изделие или партия изделий, подвергаемая сплошному или выборочному контролю, отдельный образец или партия, от которой берется оговоренная НТД выборка (проба).

Если объектом испытаний является макет или модель изделия, то результаты испытаний относятся непосредственно к макету или модели. Однако если при испытании какого-либо изделия некоторые его элементы заменяют моделями или отдельные характеристики изделия определяют на моделях, то объектом испытаний остается само изделие, а оценку характеристик этого изделия получают на основе испытаний модели.

При выборе объекта испытаний учитывают следующие требования:

- необходимость доказательства работоспособности изделия при оговоренных в НТД условиях эксплуатации;
- необходимость доказательства соответствия параметров надежности изделия (изделий) требуемым в НТД значениям;
- минимальная стоимость испытаний (включая затраты на испытательное оборудование);
- минимальная продолжительность испытаний;
- наличие соответствующего оборудования и оснастки, обеспечивающих проведение испытаний;
- необходимость обеспечения взаимозаменяемости отдельных функциональных частей и блоков;
- возможность обеспечения оптимального контроля технологических процессов;
- необходимость определения параметров надежности комплектующих элементов, применяемых в изделии.

Следует отметить противоречивый характер первых четырех требований. Так, при современных тенденциях микроминиатюризации комплектующих изделий РЭС растет трудоемкость полной проверки их работоспособности. Получение более объективных показателей надежности изделий связано с ростом числа объектов и длительности их испытаний. Это также удорожает испытания на надежность.

## Основные разделы программы испытаний

Основным организационно-методическим документом при испытаниях РЭС является программа испытаний. Программа испытаний – это обязательный для исполнения организационно-методический документ, который устанавливает объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний.

Описание объекта испытаний является обязательным разделом программы испытаний. В программе в краткой форме дается информация об объекте испытания – срок его изготовления, номер ТУ и паспорта для заводских изделий, особенности конструкции и технологии.

При описании объекта в программе испытаний указываются тактико-технические характеристики объекта, подлежащие измерению или определению по измеряемым значениям других параметров; критерии годности и надежности изделия; требования к внешнему виду, электрическим и другим параметрам.

**Описание цели испытаний.** Целью испытаний определяется вся программа – финансирование испытаний, распределение ответственности за получение и использование результатов.

Все планируемые испытания по своему назначению подразделяются на четыре группы: исследовательские, контрольные, сравнительные, определительные.

Цель испытаний раскрывает их назначение и должна полностью отражаться в наименовании испытаний.

Чтобы сформулировать наименование испытаний, необходимо установить их назначение, т.е. определить по цели их проведения, к какой из четырех групп можно отнести испытания.

Далее следует определить уровень проведения испытаний (государственные, межведомственные, ведомственные), а затем установить отношение испытаний либо к этапам разработки продукции (доводочные, предварительные, приемочные), либо к видам испытаний готовой продукции (квалификационные, предъявительские, приемо-сдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттестационные, сертификационные).

Условия и место проведения испытаний также учитываются при определении наименования испытаний (лабораторные, стендовые, полигонные, натурные, испытания с использованием моделей, эксплуатационные).

В наименовании испытаний должны быть учтены и другие признаки видов испытаний – продолжительность испытаний (нормальные, ускоренные, сокращенные); вид воздействия (механические, климатические, тепловые, радиационные, электрические, электромагнитные, магнитные, химические, биологические); результат воздействия (неразрушающие, разрушающие, испытания на стойкость, прочность, устойчивость); направленность на определенную характеристику объекта (функциональные испытания, испытания на надежность, испытания на транспортабельность, граничные испытания, технологические испытания).

Наименования испытаний могут иметь два и более признака из числа перечисленных, например, «межведомственные периодические стендовые испытания на надежность».

Объем и методика испытаний – раздел программы испытаний, в котором даются сведения о количестве испытываемых изделий; общей продолжительности испытаний и продолжительности испытаний при различных воздействующих факторах; о режимах испытаний, пределах изменения питающих напряжений, продолжительности работы изделий при этих напряжениях и т.д.

Для конкретных изделий виды испытаний, их объем и режимы могут быть определены из государственных стандартов, устанавливающих цель проведения испытаний на воздействие различных объективных факторов, виды испытаний, требования к объектам испытаний, обработке и оформлению результатов, а также технологической документации на испытываемые изделия.

План проведения испытаний – составная часть программы испытаний. В плане указываются работы, которые необходимо выполнить для проведения испытаний: изготовление образцов, приемка образцов ОТК, измерение и определение параметров образцов, подготовка испытательного оборудования, проведение испытаний, оформление результатов испытаний, согласование и утверждение протокола испытаний и др.

Программа испытаний после ее согласования и утверждения является документом, обязательным для исполнения, план проведения испытаний контролируется службой управления качеством предприятия.

В отчете по испытаниям РЭС приводят сведения об объекте, цели, месте и времени испытаний, материально-техническом обеспечении, условиях и результатах испытаний и даются выводы и рекомендации по результатам испытаний. Программа подписывается руководителями подразделений, принимавших участие в проведении испытаний, и при необходимости – представителем заказчика.



## **Взаимосвязь программ испытаний**

Испытания являются неотъемлемой частью процесса разработки систем, в которых используются проектируемые РЭС. Этот процесс включает испытания изделий, относящихся к различным структурным уровням РЭС – комплектующие изделия электронной техники (нулевой уровень); микросборки (первый уровень); функциональные сборочные единицы (второй уровень); блоки (третий уровень); готовые РЭС (четвертый уровень). Кроме того, каждый тип РЭС предназначен для работы в системе, и поэтому РЭС испытываются в составе системы.

Применение системного подхода к планированию проектирования РЭС и систем, включающих РЭС как составную часть, обуславливает необходимость составления комплексной программы испытаний, проводимых на всех этапах проектирования.

Комплексная программа должна обеспечивать:

- полный учет и систематизацию результатов всех испытаний;
- оптимизацию испытаний по показателям эффективности.

В комплексную программу испытаний включают все частные программы, регламентирующие испытания изделий разных структурных уровней, проводимые на различных стадиях проектирования системы. Одновременное рассмотрение (анализ) частных программ позволяет рационально определить цели испытаний каждой частной программы, сформулировать критерии законченности испытаний и готовности объекта к дальнейшему использованию в составе изделий более высокого уровня. Важно не только то, чтобы комплексная программа испытаний составлялась на раннем этапе проектирования. Важно, чтобы планирование испытаний проводилось с достаточной подробностью и охватывало все элементы конструкции. Только при таком подходе все испытания будут представлять единый комплекс и дадут совместимые данные, обеспечивающие полноту анализа полученных результатов. Например, условия испытаний различных объектов на внешние воздействия должны быть строго согласованы (единая температура, время воздействия и т.д.), чтобы имелась возможность провести сравнение результатов испытаний.

Анализ специфики испытаний, проводящихся на различных уровнях разработки системы, позволяет сопоставить их достоинства и недостатки. Если выделить испытания, проводимые на изделиях различных структурных уровней РЭС (низшие уровни испытаний) и испытания, проводимые на уровне систем (высшие уровни испытаний), то можно отметить достоинства и недостатки каждой из выделенных групп испытаний.

К достоинствам испытаний, проводимых на низших уровнях, относят:

- возможность оценки уровня сборки, на котором еще можно выполнить замену элементов;
- возможность испытаний блоков с независимым вводом данных (снимается проблема взаимного влияния);
- возможность быстрого обнаружения слабых мест изделий, выявления процессов деградации, причин и механизмов отказа отдельных элементов;
- удобство оценки динамических характеристик.

В то же время имеются недостатки рассматриваемой группы испытаний:

- невозможность оценки некоторых параметров, влияющих на совместную работу блоков;
- трудности оценки проявления постепенных отказов.

Достоинства испытаний, проводимых на уровне систем:

- возможность оценки характеристик системы в целом;
- возможность обнаружения взаимного влияния блоков;
- проверка возможности замены блоков.

Недостатки таких испытаний состоят в следующем:

- невозможность оценки характеристик блоков, входящих в состав системы;
- неизбежность забракования всего комплекта РЭС при отказе системы;
- трудности в определении места отказа.

При составлении комплексной программы учитывают возможности, достоинства и недостатки каждого уровня испытаний. При этом согласуют задачи частных программ, что позволяет исключить дублирование работ и обеспечивает наиболее полную систематизацию результатов испытаний.

### **Общие принципы построения и содержания методики испытаний**

Методика испытаний – это организационно-методический документ, обязательный к исполнению. В нем формулируют метод испытаний, средства и условия испытаний, отбора проб, алгоритмы выполнения операций по определению одной из нескольких взаимосвязанных характеристик свойств объекта, указывают формы представления данных и оценивают точность, достоверность результатов, требования техники безопасности и охраны окружающей среды при проведении испытаний.

Методика испытаний РЭС должна определять вид и цель испытаний; сроки и место проведения испытаний; условия проведения испытаний; по-

рядок подготовки РЭС и испытательного оборудования к испытаниям; указания по рассмотрению технической документации, предъявляемой на испытания; методику экспериментальных исследований испытываемых изделий; методику обработки результатов измерений при испытаниях; критерии положительных результатов испытаний; требования к оформлению результатов испытаний.

Методика испытаний может быть изложена в самостоятельном документе или в программе испытаний. Она является составной частью НТД на изготавливаемые РЭС.

Основные требования, предъявляемые к методике испытаний, – требования по выбору метода испытания.

Метод испытания – это совокупность правил применения определенных принципов и средств для осуществления испытаний. Он должен обеспечить выполнение задачи проверки изделий на соответствие требованиям ТЗ или НТД на изделия. При выборе метода учитывают конструктивно-технологические особенности изделия, нормы контролируемых параметров и требуемую точность их измерения, требования техники безопасности при проведении испытаний. Для большинства испытаний устанавливают нормы в виде ряда степеней жесткости (степени жесткости соответствуют различным условиям эксплуатации).

Методика должна предусматривать испытания по всем параметрам, предъявляемым к РЭС, – это требования к средствам испытаний.

Под ними понимают требования к техническим устройствам, веществам и материалам, применяемым при проведении испытаний. Сюда относят прежде всего испытательное оборудование – средство испытаний, представляющее собой техническое устройство для воспроизведения условий эксплуатации.

Составной частью средств испытаний являются средства измерений. Последние могут быть встроенными в испытательное оборудование или автономно применяемыми при испытаниях для измерения тех или иных параметров объекта или для контроля условий испытаний. К средствам испытаний следует относить также вспомогательные технические устройства для крепления объектов испытаний, регистрации и обработки результатов.

Методика испытаний должна быть технически обоснована и экспериментально апробирована.

Программа и методика испытаний должна составляться разработчиком при участии метрологической службы и службы испытаний, согласовываться с заказчиком и утверждаться организацией, проводящей испытания.

В процессе испытаний программа и методика испытаний могут быть дополнены и уточнены.

Воспроизводимость результатов испытаний определяется уровнем качества методики испытаний и свойствами объекта испытаний. Очень важно при оценке результатов испытаний выделить ту часть погрешностей полученных данных, которая может быть обусловлена методикой испытаний. Поэтому основные требования к методике – обеспечить максимальную эффективность процесса испытаний и минимально возможную погрешность полученных результатов.

Методика испытаний должна содержать описание следующих этапов: проверка испытательного оборудования; подготовка испытываемых изделий; совместная проверка испытательного оборудования и испытываемого изделия; регистрация результатов испытаний и данных об условиях их проведения.

Большая часть характеристик испытываемого изделия определяется посредством измерений. При выборе параметров, подлежащих измерениям и контролю в процессе испытаний, необходимо исходить из предварительного анализа влияния объективных факторов на изменение свойств данного или аналогичного типа изделия, включая оценку изменения внешнего вида.

Регистрация результатов испытаний обеспечивается развернутой формой записи данных, подробным описанием выполняемых регулировок, операций с устройствами управления (переключателями, кнопками, клавишами, рычагами, тумблерами и т.д.), составлением схем расположения приборов, монтажных схем.

Форма записи данных должна быть достаточно подробной и гарантировать регистрацию всех входных и выходных данных с указанием единиц измерения, приведенных к единой системе. Должно быть предусмотрено место для записи параметров окружающей среды, даты регистрации; сведений о лицах, проводящих испытания; информации, описывающей точную конфигурацию испытываемого изделия и его массогабаритные характеристики. Форма записи данных должна содержать сведения о критериях приемки или браковки в случае приемно-сдаточных испытаний. Если испытания проводятся не с целью приемки изделия, то в форме предусматривается запись отчетов с учетом погрешностей испытательного оборудования.

## Глава 3. МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ РЭС НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 3.1. Особенности методики испытаний

Испытания РЭС на воздействие климатических факторов проводят для проверки способности изделий выполнять свои функции, сохранять параметры и (или) внешний вид в пределах установленных норм при воздействии климатических факторов [1, 10, 16].

Принята следующая структура методики испытаний РЭС на климатические воздействия:

- предварительная выдержка (стабилизация свойств изделия), первоначальные измерения параметров и внешний осмотр изделия;
- установка изделий в камеры, выдержка их в условиях испытательного режима, извлечение из камер и восстановление (конечная стабилизация свойств);
- внешний осмотр изделий и заключительные измерения параметров изделия.

Предварительную выдержку проводят с целью полного или частичного устранения последствий воздействия на изделия предыдущих условий. Изделия выдерживают, как правило, в нормальных климатических условиях (при температуре  $25 \pm 10$  °С, относительной влажности 45 – 75 %, атмосферном давлении, равном  $(0,86 - 1,06) \cdot 10^5$  Па).

Выдержку изделий, на результаты измерения параметров которых может существенно влиять относительная влажность, выполняют в условиях, обеспечивающих воспроизводимую толщину влаги, адсорбированной на поверхности изделия. Эти условия предусматривают строгое поддержание температуры (допустимое отклонение  $\pm 0,5$  °С) при относительной влажности 73 – 77 %. Продолжительность предварительной выдержки определяется временем, достаточным для установления теплового равновесия изделий с окружающей средой. Обычно оно не превышает 2 ч. Первоначальные и заключительные измерения параметров изделий проводятся при одних и тех же значениях температуры и влажности окружающей среды.

При установке изделий в камере климатических испытаний необходимо следить за тем, чтобы между изделиями и стенками камеры, а также между самими изделиями свободно циркулировал воздух. Способ установки и положение изделий при испытании имеют большое значение для воспроизводимости его результатов. Если при эксплуатации возможно несколько вариантов положения изделия, то следует выбрать вариант, обес-

печивающий наибольшую жесткость испытания. Если в процессе испытания электрическая нагрузка на РЭС не подается, изделия располагают на сетках из капроновых нитей, натянутых на опоры. При испытании с электрической нагрузкой изделия устанавливают на специальных платах, приспособлениях (кассетах, держателях, контактирующих устройствах). Металлические части приспособлений обязательно должны иметь антикоррозионное покрытие. Время выдержки в испытательном режиме отсчитывают с момента установления режима в камере. Это время при повышенной (пониженной) температуре должно быть достаточным для прогрева (охлаждения) изделий по всему объему.

Изделия в выключенном состоянии считаются достигшими температуры окружающей среды (теплового равновесия), если температура самых массивных частей (или других частей, указанных в ПИ и ТУ), определяющих прогрев по всему объему, отличается от температуры окружающей среды не более чем на  $\pm 3$  °С. Время прогрева (охлаждения) изделий по всему объему устанавливают на этапе предварительных испытаний с помощью датчиков контроля температуры. Допускается не контролировать температуру частей аппаратуры, если эти части не имеют защиты, предназначенной для теплоизоляции. В этом случае изделие, в зависимости от массы, выдерживают для достижения температуры окружающей среды: 2 ч – при массе изделия не более 2 кг; 3 ч – 2 – 10 кг; 4 ч – 10 – 20 кг; 6 ч – 20 – 50 кг; 8 ч – 50 – 100 кг; 10 ч – 100 – 300 кг. Требования к объему камеры в зависимости от размеров испытываемой аппаратуры и значения теплорассеивания с единицы ее поверхности устанавливают с учетом рекомендаций государственных стандартов.

При невозможности измерения параметров изделия без извлечения из испытательной камеры при различных видах испытаний допускается проводить эти измерения вне камеры. Методика и время измерения параметров после извлечения из камеры оговариваются в ПИ и ТУ на изделие.

Допустимые отклонения воздействующих климатических факторов не должны превышать значений, указанных в табл. 3.1, если в НТД не указаны иные допускаемые отклонения, обусловленные спецификой эксплуатации изделия.

Внешний осмотр изделий осуществляется в соответствии с НТД.

Климатические испытания проводят не только на стадии проектирования РЭС, но и в серийном производстве для отбраковки потенциально ненадежных изделий (приемо-сдаточные испытания) и для контроля стабильности производства (периодические испытания).

Режимы и условия испытания РЭС устанавливаются в зависимости от степени жесткости, которая, в свою очередь, определяется условиями дальнейшей эксплуатации РЭС в составе системы. Изделия считают выдержавшими испытание, если они во время и после его проведения удовлетворяют требованиям, заданным в ПИ и ТУ для данного вида испытаний.

Таблица 3.1

**Допустимое отклонение воздействующих климатических факторов**

Воздействующий фактор	Допустимое отклонение
Температура, °С: -200 – -85 -85 – +100 100 – 200 свыше 200	±5 °С ±2 °С ±5 °С ±10 °С
Скорость изменения температуры окружающей среды, °С/мин: 1 – 5 5 – 10	±20 % ±50 %
Относительная влажность по ТУ	±3 %
Пониженное давление: выше 1,33·100 Па (1 мм рт. ст.) 1,33·100 – 1,33 Па (0,01 мм рт. ст.) ниже 1,33 Па	±5 % или 1,33·100 Па* ±60 % ±30 %
Повышенное избыточное давление по ТУ, Па	±20 %
Солнечное излучение: интегральная плотность потока по ТУ, Вт·м <sup>-2</sup> плотность потока ультрафиолетовой части спектра по ТУ, Вт·м <sup>-2</sup>	±10 % ±25 %
Интенсивность дождя, кг·м <sup>-2</sup>	±40
Массовая концентрация пыли по ТУ, г·л <sup>-1</sup>	±25 %
Скорость ветра по ТУ, м·с <sup>-1</sup>	±10
Массовая концентрация (массовая доля) коррозионно-активных агентов по ТУ, г·л <sup>-1</sup>	+10

\* Допустимое отклонение в паскалях берется в том случае, если оно больше допустимого отклонения в процентах.

Для повышения информативности и эффективности климатических испытаний при освоении и производстве изделий целесообразно проводить их в последовательности, при которой каждое последующее испытание усиливает воздействие предыдущего, которое могло бы остаться незамеченным. Рекомендуется так называемая *нормализованная последовательность климатических испытаний*, включающая испытание при повышенной температуре, кратковременное испытание на влагуостойчивость в

циклическом режиме (первый цикл), испытания на воздействие пониженных температуры и атмосферного давления, испытание на влагоустойчивость в циклическом режиме (остальные циклы).

При этом между любыми из указанных испытаний допускается перерыв не более трех суток, за исключением интервала между испытаниями на влагоустойчивость и на воздействие пониженной температуры, который не должен превышать 2 ч. Параметры изделия обычно измеряют в начале и в конце нормализованной последовательности.

## 3.2. Испытания на температурные воздействия

### 3.2.1. Испытания на повышенную температуру

Испытания на воздействие повышенной температуры проводят с целью определения способности РЭС сохранять свои параметры и внешний вид в пределах ТУ в процессе и после воздействия верхнего значения температуры.

Различают два метода испытания РЭС на воздействие повышенной температуры: испытание *под термической нагрузкой* и испытание *под совмещенной термической и электрической нагрузкой*.

*Первому методу испытаний* подвергаются нетеплорассеивающие изделия, температура которых в процессе эксплуатации зависит только от температуры окружающей среды, *второму* – теплорассеивающие РЭС, которые в рабочем состоянии нагреваются за счет выделяемой мощности под действием электрической нагрузки.

Изделия, отобранные для испытаний, должны удовлетворять требованиям ТУ по внешнему виду и по значениям контролируемых параметров.

При испытании под совмещенной нагрузкой изделия помещают в камеру и испытывают под нормальной или максимально допустимой для данных изделий электрической нагрузкой, соответствующей верхнему значению температуры внешней среды, устанавливаемому в зависимости от степени жесткости испытаний (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Степень жесткости испытаний на повышенные температуры

Степень жесткости	I	IV	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
Температура, °C	40	50	70	85	100	125	155	200	250	315



В отечественной практике время испытания на повышенные температуры определяется временем, необходимым для достижения испытываемым изделием теплового равновесия. В зарубежной практике степень жесткости определяется не только температурой испытаний, но и временем выдержки при этой температуре и выбирается из ряда 2, 16, 72, 96 ч.

Возможны два вида проведения испытаний теплорассеивающих изделий.

*При первом способе* достижение заданного температурного режима изделий определяется контролем температуры воздуха в камере, которая устанавливается равной верхнему значению температуры окружающей среды при эксплуатации (указанной в ТУ).

*При втором способе* достижение заданного температурного режима изделий определяют контролем температуры участка (блока) изделия, который имеет наибольшую температуру или является наиболее критичным для работоспособности изделия.

Испытания первым способом возможны, когда объем камеры достаточно велик. Чтобы имитировать условия свободного обмена воздуха, в камере отсутствует принудительная циркуляция воздуха или ее охлаждающим действием можно пренебречь. Проведение испытания по первому способу возможно также в случае, когда температура перегрева участка (узла) изделия, определенная в нормальных климатических условиях (вне камеры), не превышает 25 °С и разность заданной температуры воздуха в камере при испытании и температуры нормальных климатических условий не превышает 35 °С. В остальных случаях испытание теплорассеивающих изделий следует проводить вторым способом. При испытании изделий только под термической нагрузкой их выдерживают при данной температуре в течение заданного времени.

Измерение параметров испытываемых изделий проводят после достижения теплового равновесия без извлечения изделий из камеры. Для проведения измерений изделие подключают к наружным коммутационным цепям измерительной системы. Если измерение параметров без извлечения из камеры технически невозможно, то допускается изъятие изделия из камеры для измерения. Однако время измерения не должно превышать 3 мин, если другое значение времени специально не оговорено в ТУ.

Для испытаний на повышенные температуры применяют специальные *камеры тепла* (рис. 3.1).

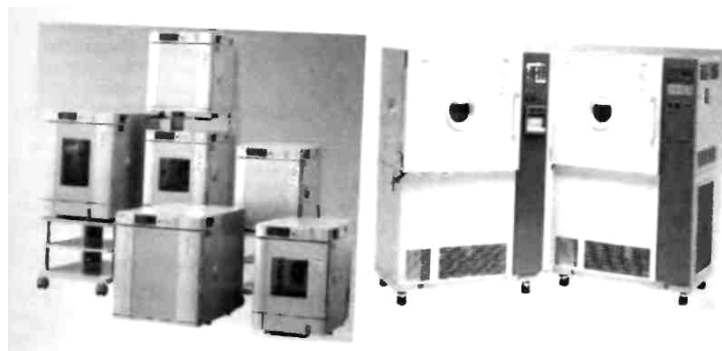


Рис. 3.1. Климатические камеры температуры и влажности SU, SH.

<p>Рабочий объем 22,5 и 64 литра            Диапазон температур –            от –60 до +150 °С (+/-0,5 °С)            Дополнительные технологические            отверстия диаметром 25/50/100 мм            Возможность удаленного управления            с компьютера            Интерфейсы – RS-485; E-BUS, GP-IB, RS-232            Емкость программы 9 шагов</p>	<p>Рабочий объем 64 литра            Диапазон температур –            от –85 до +180 °С (+/-0,5 °С)            Дополнительные технологические            отверстия диаметром 25/50/100 мм            Возможность удаленного управления            с компьютера            Интерфейсы – RS-485; E-BUS, GP-IB, RS-232            Возможность установки самописца</p>
---	--

### 3.2.2. Испытания на пониженную температуру

Испытания на воздействие пониженных температур проводят с целью проверки параметров изделий в условиях воздействия низкой температуры внешней среды, а также после пребывания их в этих условиях. Изделия помещают в камеру холода (рис. 3.2), после чего устанавливают нижнее значение температуры по ТУ (табл. 3.3).



<p>Рабочий объем 306/1000 литров            Диапазон температуры/влажности –            от –70 до +150 °С (+/-0,5 °С)/            от 20 до 98 отн. %            Сила вибрации – от 0,98 до 29,4 кН            Максимальная загрузка – от 66 до 492 кг            Возможность установки самописца</p>
--

Рис. 3.2. Климатическая камера низкой температуры MC

Материалы, применяемые для крепления малогабаритных изделий, должны обладать высокой теплопроводностью.

Таблица 3.3

**Степени жесткости испытаний на холодоустойчивость**

Степень жесткости	III	IV	VII	VIII
Температура, °С	-10	-25	-45	-60

Время выдержки при заданной температуре выбирают в зависимости от установленной жесткости испытаний из временного ряда значений, приведенных в ТУ. Проводятся измерения тех же параметров, что и при испытании на воздействие повышенных температур.

Для проверки работоспособности изделия предусматривается выдержка изделий под электрической нагрузкой при заданной температуре.

Требования по расположению испытываемых изделий аналогичны требованиям при испытании на воздействие повышенных температур.

### **3.2.3. Испытания на изменение температур**

Испытания на изменение температур проводятся для определения способности изделий противостоять быстрой смене температур.

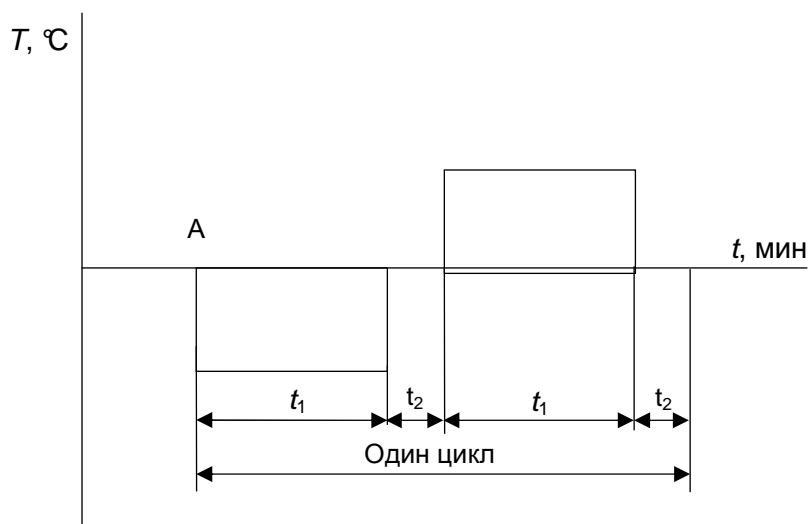
Испытания проводятся одним из следующих методов.

*Метод двух камер (быстрое изменение температуры).* Испытания проводят в камерах тепла и холода без подачи на изделия электрической нагрузки. Изделия подвергают воздействию трех непрерывно следующих друг за другом циклов, если большее число циклов не установлено в ТУ. Каждый цикл состоит из следующих этапов:

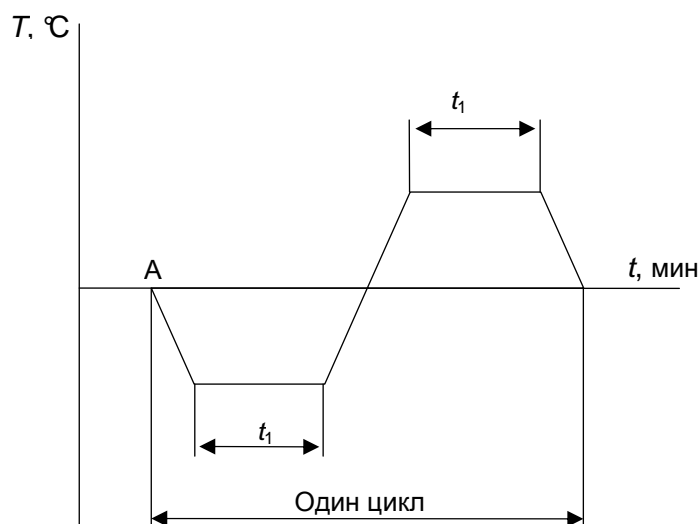
- изделия помещают в камеру холода и выдерживают в течение времени, установленного в ТУ (рис 3.3, а);
- после выдержки в камере холода изделия переносят в камеру тепла и выдерживают в течение определенного времени.

*Метод одной камеры (постепенное изменение температуры).* Испытания проводят без подачи на изделия электрической нагрузки. Изделия подвергают воздействию двух непрерывно следующих друг за другом циклов. Каждый цикл состоит из следующих этапов:

- изделия помещают в камеру, после чего температуру понижают и выдерживают в течение времени, указанного в ТУ;
- температуру в камере повышают, выдерживают и понижают в течение определенного времени (см. рис 3.3, б).



а)



б)

Рис. 3.3. Графики изменения температуры одного цикла: а) – при испытании методом двух камер; б) – при испытании методом одной камеры; А – начало цикла,  $t_1$  – время выдержки,  $t_2$  – время переноса

*Метод двух жидкостных ванн* (резкое изменение температуры). Испытания проводят в двух ваннах с водой, в одной из которых вода имеет пониженную, а в другой – повышенную температуру. Изделия подвергают воздействию 10 циклов. Каждый цикл состоит из следующих этапов:

- изделия погружают в ванну с холодной водой;
- изделия погружают в ванну с кипящей водой.

*Комбинированный метод.* Испытания комбинированным методом проводят в камерах влажности, тепла и холода в следующем порядке:

- на воздействие повышенной влажности;
- на холодоустойчивость при температуре эксплуатации;

- на теплоустойчивость в камере под электрической нагрузкой;
- на воздействие повышенной влажности.

Изделия считаются выдержавшими испытание, если они удовлетворяют требованиям, заданным в ПИ или ТУ.

### 3.3. Испытания на воздействие инея и росы

Испытания этого вида проводят в целях проверки способности изделий выдерживать номинальное электрическое напряжение при конденсации на них инея и росы.

Испытания на воздействие атмосферных конденсированных осадков в лабораторных условиях проводят в камерах холода, влажности и термобарокамерах.

На рис. 3.4. показан общий вид термобарокамеры.

Перед началом и после испытания изделия выдерживают при нормальных климатических условиях, если иные условия с более жесткими допусками на оговорены в НТД или ПИ, и измеряют параметры, указанные в стандартах и ТУ на изделие и ПИ, в том числе проводят проверку полным испытательным напряжением.

Порядок испытаний следующий:

- изделия помещают в камеру холода и выдерживают при температура минус  $20 \pm 5$  °С в течение 2 ч;
- изделия извлекают из камеры, помещают в нормальные условия, после чего на изделия подают электрическое напряжение, причем вид напряжения, его значение, время выдержки и место приложения устанавливают НТД или ПИ.

Изделия считают выдержавшими испытание, если при подаче напряжения не произошло пробоя.

Рабочий объем 18, 18 × (2 области),

46, 46 × (2 области) литров

Диапазон температуры/влажности –

от +105,0 до +162,2 °С /

от 75 до 100 отн. %

Диапазон давления – от 20 до 392 кПа

Интерфейсы – E-Bus, RS-332

Возможность установки самописца

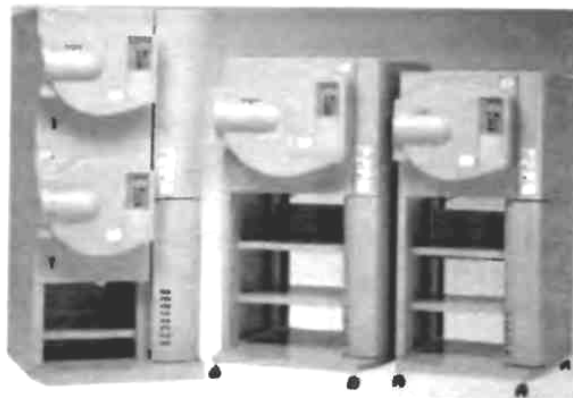


Рис. 3.4. Общий вид термобарокамеры (HAST) EHS

### 3.4. Испытания на воздействие повышенной влажности

Влагоустойчивостью называют способность аппаратуры сохранять работоспособность в условиях повышенной относительной влажности.

Различают два вида испытаний на влагоустойчивость: *длительные и кратковременные*. *Длительные* испытания проводятся с целью определения способности изделий сохранять свои параметры после длительного воздействия влажности. *Кратковременные* испытания проводятся с целью оперативного выявления грубых технологических дефектов в серийном производстве и дефектов, которые могли возникнуть в предшествующих испытаниях.

Оба вида испытаний на влагоустойчивость могут проводиться в непрерывном (без конденсации влаги) или циклическом (с конденсацией влаги) режимах. Конкретный метод испытания устанавливается в зависимости от назначения и условий эксплуатации изделий в соответствии с табл. 3.4.

Таблица 3.4

**Степень жесткости испытаний на влагоустойчивость в зависимости от условий эксплуатации изделий**

Степень жесткости	Относительная влажность		
	Верхнее значение	Среднемесячное значение в наиболее теплый и влажный период и продолжительность их воздействия в течение года при эксплуатации изделия	
		Значение	Продолжительность, мес
1	2	3	4
I	80% при 25 °С * и более низких температурах без конденсации влаги	65 % при 20 °С	12
II, III	98 % при 25 °С* и более низких температурах без конденсации влаги	80 % при 20 °С	2
IV	100 % при 25 °С* и более низких температурах без конденсации влаги	80 % при 20 °С	6
V	100 % при 25 °С* и более низких температурах с конденсацией влаги	90 % при 20 °С	12
VI	98 % при 35 °С* и более низких температурах без конденсации влаги	80 % при 27 °С	3
VII			12
VIII	100 % при 35 °С* и более низких температурах с конденсацией влаги	90 % при 27 °С	12

### 1. Испытания без конденсации влаги (непрерывный режим).

В непрерывном режиме испытаний не предусматривается конденсации влаги на изделиях, поэтому непрерывные испытания проводят при постоянных значениях температуры и влажности в камере. Изделия помещают в камеру влажности и выдерживают при температуре, указанной в табл. 3.5. Соответственно для длительного или ускоренного испытания время выдержки изделий при заданной температуре определяется необходимостью достижения изделием теплового равновесия. Затем относительную влажность воздуха в камере повышают до  $95 \pm 3 \%$  и далее поддерживают ее и температуру постоянными в течение всего времени испытания.

Таблица 3.5

#### Продолжительность испытаний на влагоустойчивость при непрерывном режиме в зависимости от степени жесткости

Температура воздуха, °С	Степень жесткости						
	Длительное испытание (сут)				Ускоренное испытание (сут)		
	II	III, IV, VI	V, VII	VIII	III, IV	V, VIII	VIII
$25 \pm 2$	2	–	–	–	–	–	–
$40 \pm 2$	–	10	21	56	–	–	–
$55 \pm 2$	–	–	–	–	4	7	14

**2. Испытания с конденсацией влаги (циклический режим).** Циклический режим испытания характеризуется воздействием повышенной влажности при циклическом изменении температуры в камере. В результате создаются условия для выпадения росы на наружных поверхностях изделий (при быстром снижении температуры) и последующего ее испарения (в период повышения температуры), что способствует интенсивному развитию процессов коррозии. При снижении температуры влага в камере может проникать внутрь изделий через различные микроканалы в сварных, паяных швах, местах соединения материалов и т.п. Физический механизм этого явления заключается в следующем. При снижении температуры в камере воздух во внутренней полости испытываемого изделия охлаждается и давление уменьшается. За счет возникающего перепада давлений в окружающем объеме и внутри полости влага диффундирует по капиллярам внутрь этой полости (корпуса). Учитывая эти особенности, испытание на влагоустойчивость в циклическом режиме следует рекомендовать в первую очередь для изделий, имеющих свободные внутренние полости, например, для изделий в пластмассовых корпусах со свободным внутренним объемом, металлостеклянных и металлокерамических корпусах со свободным объемом и т.п.

В случае длительного испытания на влагоустойчивость при циклическом режиме общая продолжительность испытания в зависимости от степени жесткости выбирается по табл. 3.6.

Таблица 3.6

**Продолжительность испытаний (сут) на влагоустойчивость при циклическом режиме в зависимости от степени жесткости**

Температура воздуха, °С	Степень жесткости				
	Длительное испытание (сут)			Ускоренное испытание (сут)	
	III, IV, VI	V, VII	VIII	V, VII	VIII
40±2	4	9	21	–	–
55±2	–	–	–	4	9

В условиях кратковременных испытаний на влагоустойчивость при циклическом режиме изделия подвергаются воздействию четырех или девяти циклов, продолжительность каждого из которых составляет 24 часа. Число циклов устанавливается по ТУ в зависимости от конструкции и назначения изделий. Существуют два метода испытаний с конденсацией влаги.

### 1. Циклический режим (16 + 8 часов)

Испытания проводят без электрической нагрузки. Изделия подвергают воздействию непрерывно следующих друг за другом циклов (рис. 3.5). Каждый цикл состоит из двух частей.

В первой части цикла изделия в течение 16 часов подвергают воздействию относительной влажности  $(93 \pm 3) \%$  при температуре, указанной на рис 3.5.

Во второй части цикла изделие в камере охлаждают в течение 8 часов до температуры не менее чем на  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  ниже указанной на рис 3.5. Относительная влажность при этом должна быть  $(94 - 100) \%$ .

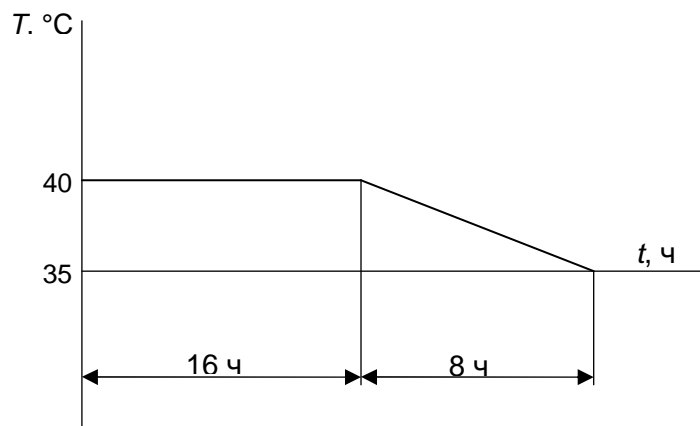


Рис. 3.5. Этапы каждого цикла (16 + 8 ч) при испытании на повышенную влажность



## 2. Циклический режим (12 + 12 часов)

Испытания проводят в камере влаги, которая должна поддерживать испытательный режим с отклонениями, не превышающими указанные на рис. 3.6.

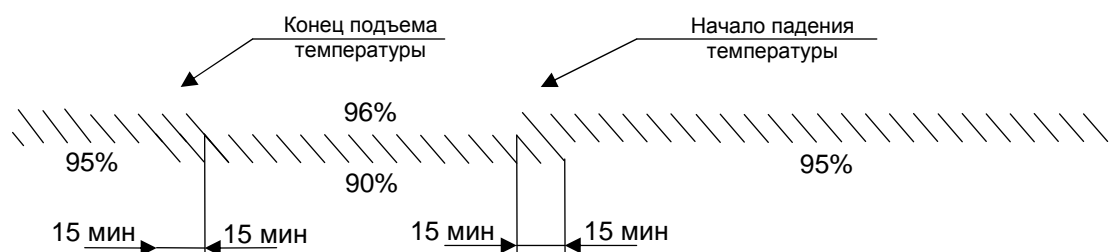
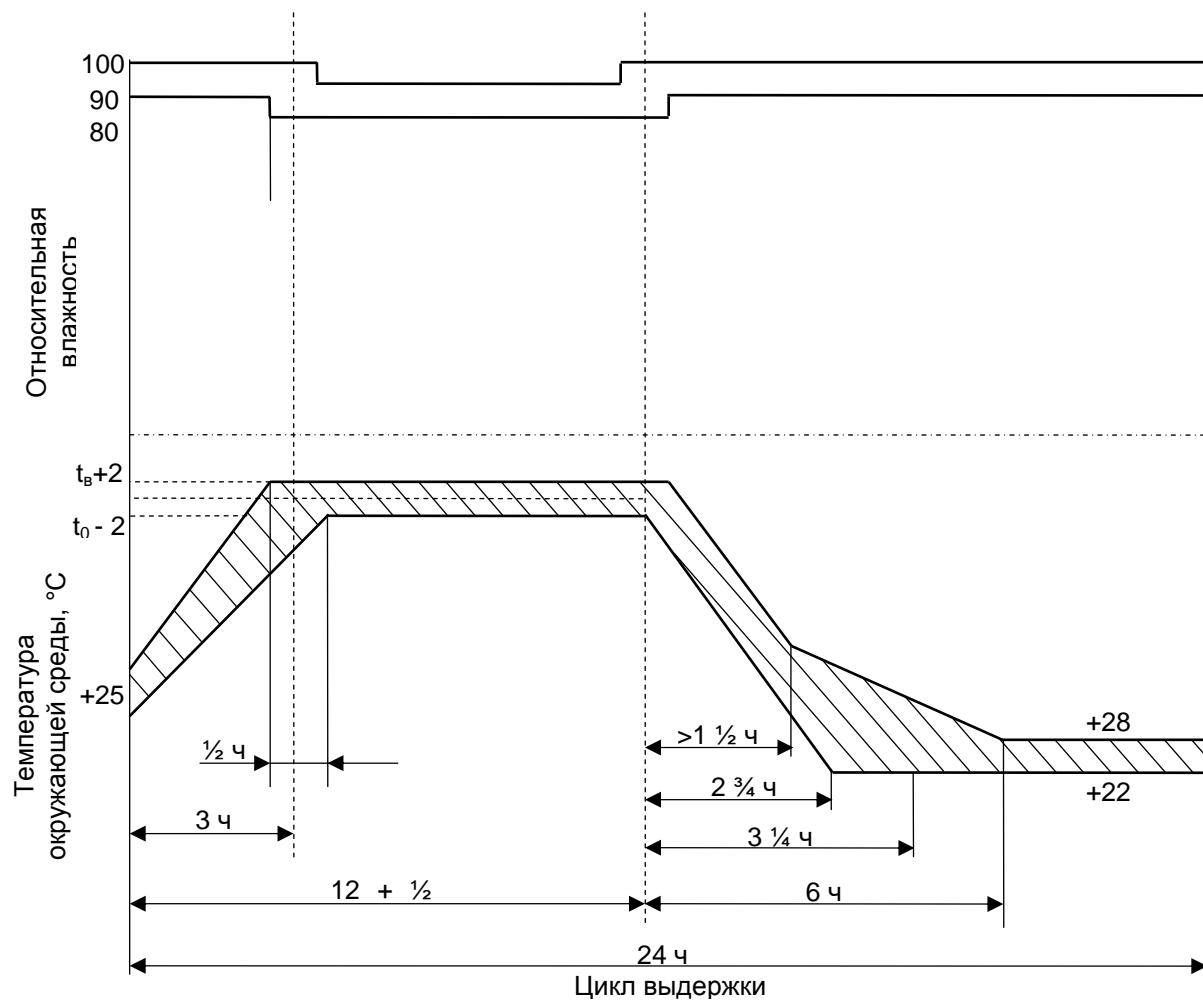


Рис. 3.6. Этапы каждого цикла (12 + 12 ч) при испытании на повышенную влажность

Изделия испытывают без электрической нагрузки. Изделия, у которых при увлажнении под напряжением может проявляться разрушающее действие электролиза или электрохимической коррозии, испытывают с приложением электрического напряжения.

Изделия выдерживают в нормальных климатических условиях испытания в течение времени, указанного в стандартах и ТУ на изделия и в программе испытаний.

Изделия устанавливают в камере и подвергают воздействию непрерывно следующих друг за другом циклов продолжительностью 24 ч каждый. Число циклов устанавливают в стандартах и ТУ на изделия и ПИ и выбирают по табл. 3.7.

Повышение температуры и влажности при проведении каждого цикла должно быть достаточно быстрым, чтобы обеспечить конденсацию влаги (выпадение росы) на изделиях.

В камере устанавливают температуру  $(25 + 2) ^\circ\text{C}$  и относительную влажность не менее 95 %. Температуру в камере повышают до температуры, указанной в табл. 3.7, в течение  $(3 \pm 0,5)$  ч.

Таблица 3.7

**Режимы испытаний на повышенную влажность, циклический режим (12 + 12 ч)**

Характеристика испытаний	Длительное испытание для степеней жесткости			Ускоренное испытание для степеней жесткости	
	IV, XII	V	IX	V	IX
Общая продолжительность выдержки (число циклов)	6	12	21	4	9
Верхняя температура, $^\circ\text{C}$	$40 + 2$	$40 + 2$	$40 + 2$	$55 \pm 2$	$55 + 2$

В течение этого периода относительная влажность должна быть не менее 95 %, за исключением последних 15 мин, в течение которых она должна быть не менее 90 %. На изделиях в этот период должна конденсироваться влага.

В камере поддерживают температуру, указанную в табл. 3.7, в течение  $(12 + 0,5)$  ч от начала цикла.

Относительная влажность в этот период должна быть  $(93 + 3) \%$ , за исключением первых и последних 15 мин, когда она должна быть в пределах от 90 до 100 %. В течение последних 15 мин на изделиях не должно быть конденсации влаги. Температуру в камере понижают до  $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$  в течение 3 – 6 ч. В течение этого периода относительная влажность должна быть не менее 95 %. Скорость снижения температуры в течение первых

1,5 ч должна быть такова, что если бы температура снижалась с этой скоростью до  $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$ , указанная температура могла бы быть достигнута за  $3 \text{ ч} \pm 15 \text{ мин}$ .

*Примечание.* Допускается производить снижение температуры до  $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$  за 3 – 6 ч без дополнительного требования для первых 1,5 ч, а относительную влажность при этом поддерживать не менее 80 %. Затем температуру выдерживают на уровне  $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$  и относительную влажность – не менее 95 % до конца цикла.

В конце последнего цикла, если это установлено в стандартах и ТУ на изделие и программе испытаний, проводят проверку параметров, указанных в стандартах и ТУ на изделия и программе испытаний. Если измерение параметров без извлечения изделий из камеры невозможно, то измерения проводят с извлечением изделий из камеры в течение 15 мин с момента извлечения, если другое время не указано в стандартах и ТУ на изделия.

Не допускается проводить измерение параметров при наличии на изделиях конденсированной влаги.

Испытания на влагуустойчивость проводят в специальных камерах тепла и влаги. Параметры применяемых отечественных термовлагокамер приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

**Характеристики отечественных термовлагокамер**

Модель	Рабочий объем, м <sup>3</sup>	Диапазон температур, °С	Относительная влажность, %	Точность поддержания		Время достижения максимальной (мин)	
				Температуры, °С	относительной влажности, %	температуры	относительной влажности
КТВ-0,15-155	0,150	До 155	98	±5	±3	40	40
КТВ-0,5-55	0,5	До 155		±2		60	
КТВ-0,025	0,025	25 ... 100		±1		45	
КТХВ-0,1-10/90	0,1	-10 – +90	40 – 98	±2	±3	40	30
КТВ-0,1-90		25 – 90				30	
КТХВ-0,5-10/100	0,5	-	65 – 98			30	60
КТВ-0,5/100		10 – + 100				40	
		25 – 100					

### 3.5. Испытания на воздействие солнечного излучения

Испытания проводят для проверки сохранности внешнего вида изделий или их отдельных деталей и сборочных единиц, а также их параметров после воздействия солнечного излучения.

Данному виду испытаний подвергаются РЭС или применяемые в них конструктивные элементы и покрытия, выполненные из органических материалов, которые не подвергались другим видам испытаний.

Облучение изделий или деталей (кожухов, крышек, ручек, шкал и т.д.) осуществляют в камере солнечной радиации с источниками инфракрасного и ультрафиолетового излучения.

Изделие в камере располагают так, чтобы его наиболее уязвимые части находились под воздействием источника облучения и не было взаимной экранизации. Спектр ультрафиолетового излучения должен лежать в пределах 280 – 400 нм. Интегральная плотность теплового потока солнечного излучения должна составлять  $1120 \text{ Вт/м}^2 + 10 \%$ , плотность потока ультрафиолетовой части спектра  $68 \text{ Вт/м}^2 \pm 25 \%$ . В камере осуществляют проверку воздействия ультрафиолетовой части спектра на изделие.

Испытание проводят следующим образом: изделия помещают в камеру, включают источники ультрафиолетового излучения, после чего температуру воздуха в камере (в тени) устанавливают  $55 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Изделия облучают в течение 120 ч непрерывно или с перерывами.

Если основной целью является проверка взаимодействия ультрафиолетовой части спектра с нагревом, испытания проводят по режиму, график которого указан на рис. 3.7, при этом продолжительность испытания составляет 10 циклов.

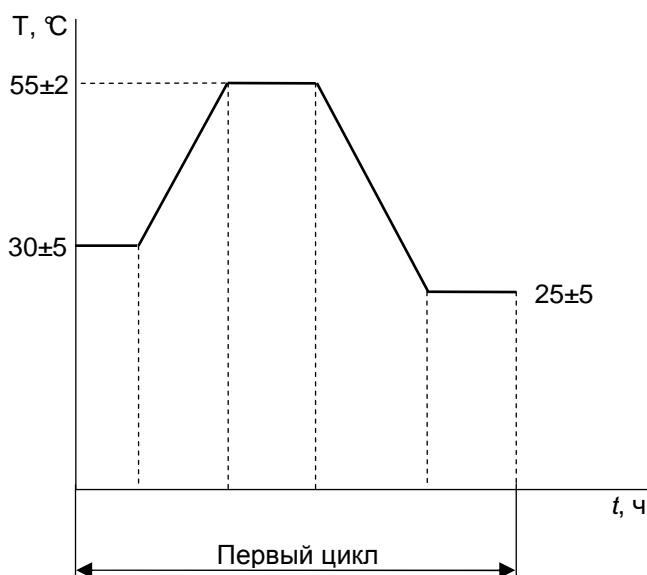


Рис. 3.7. Режим испытания на воздействие солнечной радиации

По окончании испытания изделия вынимают из камеры и проводят их внешний осмотр и измерение параметров, указанных в стандартах, ТУ или ПИ. Контролю подлежат параметры, стабильность которых зависит от состояния конструктивных деталей или сборочных единиц из органических материалов (или имеющих органическое покрытие) и подвергающихся непосредственному облучению. Изделия считаются выдержавшими испытания, если в процессе и после испытаний они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах и ТУ на изделия и ПИ для данного вида испытаний.

Проводят также испытания для проверки устойчивости изделий к разрушающему (абразивному) воздействию пыли, т.е. проверки пыленепроницаемости изделий и их работоспособности в условиях воздействия среды с повышенной концентрацией пыли (песка).

### **3.6. Испытания на воздействие пыли**

Существует два метода испытаний на воздействие пыли:

- испытание аппаратуры на воздействие статической пыли (песка);
- испытание на воздействие динамической пыли (песка).

В обоих случаях испытание изделий на воздействие пыли проводят в пыленепроницаемой камере, полезный объем которой должен превышать объем испытываемого изделия не менее чем в 5 раз. В камеру, снабженную устройством для непрерывной циркуляции воздуха, со скоростью 0,5 – 15 м/с перед испытаниями загружают пылевую смесь объемом 0,1 % полезного объема камеры.

Рабочие значения параметров, характеризующих воздействие пыли в период эксплуатации изделий (по ГОСТ 15150-69), приведены в табл. 3.9.

**Испытание аппаратуры при воздействии статической пыли** проводят для проверки способности изделий работать в среде с повышенной концентрацией пыли.

Изделия помещают в камеру и располагают на решетчатом столе таким образом, чтобы воздействие пыли было наиболее эффективным и соответствовало возможному воздействию пыли в условиях эксплуатации. Способ установки изделий указывают в стандартах, ТУ на изделия и ПИ.

Температура воздуха в камере должна быть  $55 \pm 3$  °С при относительной влажности не более 50 %. Пылевая смесь должна состоять из флюоресцирующего порошка (10 %), например, люминофора ФКП-03 (сульфид цинка), проходящего через сито с сеткой 0,05 кварцевого песка

(60 %), мела (15 %), каолина (15 %), проходящего через сито 014 (ГОСТ 6613-73). Скорость циркуляции воздуха в камере до начала оседания пыли должна быть 0,5 – 1 м/с.

Таблица 3.9

**Параметры, характеризующие воздействие пыли на изделия РЭС**

Параметры	Воздействие пыли		
	динамическое	статическое	на проникаемость
Размер частиц, мкм	< 200	< 50	< 50
Состав пылевой смеси	Кварцевый песок 70 %, мел 15 %, каолин 15 %	Кварцевый песок 60 %, мел 20 %, каолин 20 %	Не нормируется, добавляется 10 % флюоресцирующего порошка
Концентрация, г/м (% от полезного объема камеры)	0,1 %	2 ± 1 (0,1 %)	Не нормируется
Скорость, м/с	10 ... 15	0,5 ... 1	0,5 ... 1

После циркуляции воздуха в камере и последующего оседания пыли в течение 2 ч испытываемую аппаратуру извлекают из камеры, удаляют пыль с наружных поверхностей, вскрывают и облучают ультрафиолетовым светом, чтобы обнаружить проникшую в изделие пыль. При этом рекомендуется пользоваться лампами ультрафиолетового излучения типа ПРК со светофильтрами марки УФС.

**Испытание на воздействие динамической пыли.** Испытания проводят для проверки устойчивости изделий к разрушающему (абразивному) воздействию пыли. Изделия помещают в камеру пыли и располагают таким образом, чтобы воздействие пыли было наиболее эффективным и соответствовало возможному воздействию пыли в условиях эксплуатации.

Изделия подвергают воздействию пылевой смеси, находящейся во взвешенном состоянии в камере в течение 4 ч. Затем в течении 2 ч происходит оседание пыли без циркуляции воздуха в камере. Пылевая смесь содержит кварцевый песок (70 %), мел (15 %) и каолин (15 %), проходящий через сито с сеткой №0224 по ГОСТ 6313-73. Скорость циркуляции воздуха в камере до оседания пыли должна быть 10 – 15 м/с.

Аппаратура считается выдержавшей испытание, если в процессе или после испытания ее параметры удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах, ТУ и ПИ для данного вида испытаний.

### 3.7. Испытания на воздействие атмосферного давления

Испытания на воздействие пониженного и повышенного атмосферного давления проводят в целях проверки устойчивости параметров и сохранности внешнего вида изделия в условиях пониженного и повышенного атмосферного давления.

**Испытания на воздействие пониженного атмосферного давления** проводят одним из следующих методов:

- при нормальной температуре;
- при повышенной рабочей температуре для изделий, предназначенных для работы при давлении 6,7 кПа и выше;
- при повышенной рабочей температуре для изделий, предназначенных для работы при давлении ниже 6,7 кПа.

Первый метод применяют для испытания нетепловыделяющих изделий, а также для испытания тепловыделяющих изделий, для которых нагрев при электрической нагрузке, нормированной для пониженного атмосферного давления, не является критичным.

Для обеспечения воспроизводимости результатов испытаний тепловыделяющих изделий на воздействие пониженного атмосферного давления *необходимо правильно выбрать соотношение площади поверхности, окружающей изделие, и общей площади поверхности изделия по ГОСТ 20.57.406-81.*

Испытания проводят в барокамере, которая должна обеспечивать испытательный режим с отклонениями, не превышающими указанные в стандарте, ТУ или ПИ. Общий вид барокамеры ТВV-1000 (Германия) показан на рис. 3.8.

Способ установки и положение изделий при испытаниях, а также минимально допустимые расстояния между изделиями в барокамере устанавливают в стандартах, ТУ на изделия и ПИ. Минимально допустимые расстояния между тепловыделяющими изделиями в барокамере определяют в соответствии с ГОСТ 20.57.406-81.

При испытании изделий, предназначенных для работы при напряжении ниже 300 В, давление воздуха в барокамере устанавливают в соответствии с табл. 3.10 или 3.11 в зависимости от значений пониженного атмосферного давления и повышенной температуры по ТУ на изделия и ПИ. Затем проводят проверку параметров изделий.

Для изделий, предназначенных для работы при давлении 0,67 кПа (или выше) и напряжении ниже 300 В, давление в термобарокамере плавно снижают от 1,33 кПа до значения, установленного в стандартах, ТУ на изделия и ПИ. В течение всего времени изменения давления проверяют параметры, зависящие от электрической прочности воздушных промежутков.

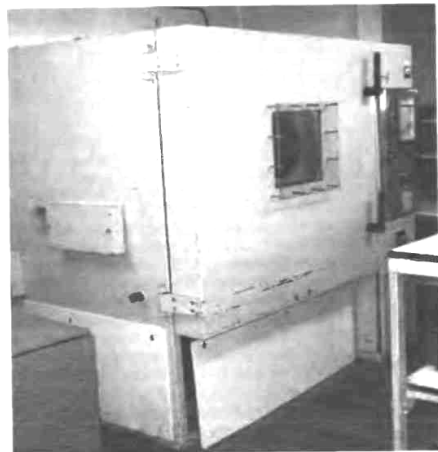


Рис. 3.8. Общий вид термобарокамеры ТВВ-1000 (Германия)

При испытании изделий, предназначенных для работы при давлении не выше 0,67 кПа и напряжении не ниже 300 В, давление в барокамере устанавливают 1,33 кПа. Затем давление плавно снижают до значений, указанных в табл. 3.10 или 3.11, при этом в течение всего времени изменения давления проверяют параметры, зависящие от электрической прочности воздушных промежутков. Перечень этих параметров устанавливают в стандартах, ТУ на изделия и ПИ.

Изделия выдерживают в условиях пониженного давления воздуха в течение времени, указанного в стандартах и ПИ. По истечении времени выдержки проверяют параметры, не извлекая изделия из камеры.

Табл. 3.10

**Давление воздуха в барокамере в зависимости от температуры**

Атмосферное пониженное давление, кПа	Температура окружающей среды при эксплуатации, °С										
	40	45	50	55	60	70	85	100	125	150	200
53,3	50,3	49,3	48,5	47,7	46,9	45,6	43,6	41,9	39,2	36,3	33,1
26,7	25,1	24,7	24,3	23,9	23,5	22,8	21,7	20,9	19,6	18,1	16,5
12,0	11,3	10,1	10,8	10,8	10,5	10,3	9,87	9,47	8,8	8,13	7,5
4,44	4,13	4,0	3,87	3,87	3,73	3,73	3,6	3,47	3,2	3,07	2,67
2,2	1,87	1,87	1,87	1,87	1,73	1,73	1,6	1,6	1,4	1,33	1,20
0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,40	0,40



**Пониженное атмосферное давление в зависимости от давления при испытании различных видов аппаратуры**

Атмосферное пониженное давление, Па	Аппаратура, не коммутирующая электрический ток под напряжением	Аппаратура, коммутирующая электрический ток под напряжением
133	133	133
13,3	67	13,3
0,13	67	13,3
0,00013	13,3	6,7

**Испытание на воздействие повышенного атмосферного давления** воздуха или другого газа проводят следующим образом: аппаратуру помещают в барокамеру, давление в которой доводят до заданного значения, выдерживают при этом давлении в течение времени, установленного в стандартах, ТУ или ПИ, и проводят проверку параметров аппаратуры; давление в камере плавно снижают до нормального, после чего изделие извлекают из камеры, подвергают внешнему осмотру, проверяют параметры.

Изделия считаются выдержавшими испытание, если в процессе испытания и после него они удовлетворяют требованиям, установленным в ТУ, стандартах и ПИ для данного вида испытаний.

При составлении требований и основных положений по проведению испытаний на воздействие атмосферного давления пользуются ГОСТ 24631-81 и ГОСТ 20.57.406-81.

### **3.8. Испытания на воздействие повышенного гидростатического давления**

Цель испытания – определение способности изделий сохранять свои параметры в условиях пребывания под водой.

Испытания проводят следующим образом:

- изделия помещают в бак, в котором создают гидростатическое давление, установленное в ТУ или стандартах;
- при этом давлении изделия выдерживают в течение 15 мин, после чего давление снижают до нормального значения;
- давление повторно повышают до значения, соответствующего предельной глубине погружения. Изделия выдерживают при этом давлении

нии в течение 24 ч, причем в конце проводят измерение параметров, указанных в стандартах и ПИ для данного вида испытаний;

– после этого давление снижают до нормального и, не извлекая изделия из воды, проверяют параметры, указанные в стандартах и ПИ. После извлечения изделия из воды проводят проверку параметров, указанных в стандартах и ПИ.

Изделия считают выдержавшими испытание, если в процессе и после испытания они удовлетворяют требованиям, установленным в НТД или ПИ.

### **3.9. Испытания на воздействие соляного тумана**

Испытания проводят в целях определения коррозионной стойкости изделий в атмосфере, насыщенной водными растворами солей.

Изделия помещают в камеру, температуру в которой устанавливают равной  $27 \pm 2$  °С, и подвергают воздействию соляного тумана. Изделия располагают в камере так, чтобы в процессе испытания брызги раствора из пульверизатора или аэрозольного аппарата, а также капли с потолка, стен и системы подвесов попадали на изделия.

Если изделие эксплуатируют в защитной оболочке, оно должно испытываться в ней.

Туман образуется распылителем – центробежным аэрозольным аппаратом или пульверизатором соляного раствора, который готовят, растворяя в дистиллированной (деионизованной) воде хлористый натрий по ГОСТ 4233-77. Раствор распыляют через каждые 45 мин в течение 15 мин.

Туман должен обладать дисперсностью 1 – 10 мкм (95 % капель) и водностью 2 – 3 г/м<sup>3</sup>. Методы определения дисперсности и водности тумана приведены в ГОСТ 16962-71.

По окончании испытания изделия промывают в дистиллированной воде, если это указано в ПИ или стандартах, после чего они должны быть просушены.

Общее время испытания составляет 2, 7 или 10 суток. Конкретное время испытания устанавливается в стандартах и ПИ.

Изделия считают выдержавшими испытания, если они по внешнему виду удовлетворяют требованиям ТУ или стандарта на изделия для данного вида испытаний.

### 3.10. Испытания на внешнее воздействие воды

По степени защищенности от воздействия воды изделия выпускают, как известно (ГОСТ 17786-72), в четырех исполнениях – В1, В2, В3, В4.

Изделия должны быть работоспособны и сохранять свои характеристики при следующих условиях:

В1 – при воздействии дождя, падающего под углом не более  $60^\circ$  к вертикали;

В2 – при воздействии брызг воды, падающих в любом направлении;

В3 – при воздействии струй воды, падающих в любом направлении;

В4 – при полном погружении в воду.

Испытание изделий исполнения В1 проводят на испытательной установке (рис. 3.9) путем подачи на изделие воды, проходящей через отверстия в качающейся трубке (7). Трубка с внутренним диаметром 18 мм в виде полукольца имеет по всей длине на внутренней стороне отверстия диаметром 0,4 мм, расположенные через 50 мм. Трубка совершает колебательные движения с отклонением на угол  $60^\circ$  от вертикали в обоих направлениях со скоростью 1,05 рад/с ( $60^\circ$  в 1 с). Радиус дуги трубки должен быть наименьшим в зависимости от габаритных размеров изделия (выбирается из ряда 160, 250, 400, 630 мм). Давление воды у входа в трубку 0,1 МН/м кв.

Изделие устанавливают на решетчатом столе (6), обеспечивающем прохождение воды к изделию, вращающемуся вокруг вертикальной оси с частотой 1 об/ мин. Продолжительность воздействия 10 мин. Во время испытания изделие должно поворачиваться вокруг вертикальной оси. Интенсивность дождя измеряют в месте расположения изделия в течение не менее 30 с с помощью цилиндрического сборника диаметром от 10 до 20 см и высотой не менее половины диаметра.

Испытания изделий исполнения В2 на брызгозащищенность проводят по методике, приведенной выше для исполнения В1 при условии, что качающаяся трубка отклоняется на угол  $170^\circ$  от вертикали в обоих направлениях со скоростью 1,48 рад/с. Обрызгиванию продолжительностью 10 мин подвергают поочередно четыре основные стороны изделия. При размещении изделий в испытательной установке необходимо учитывать их эксплуатационное положение.

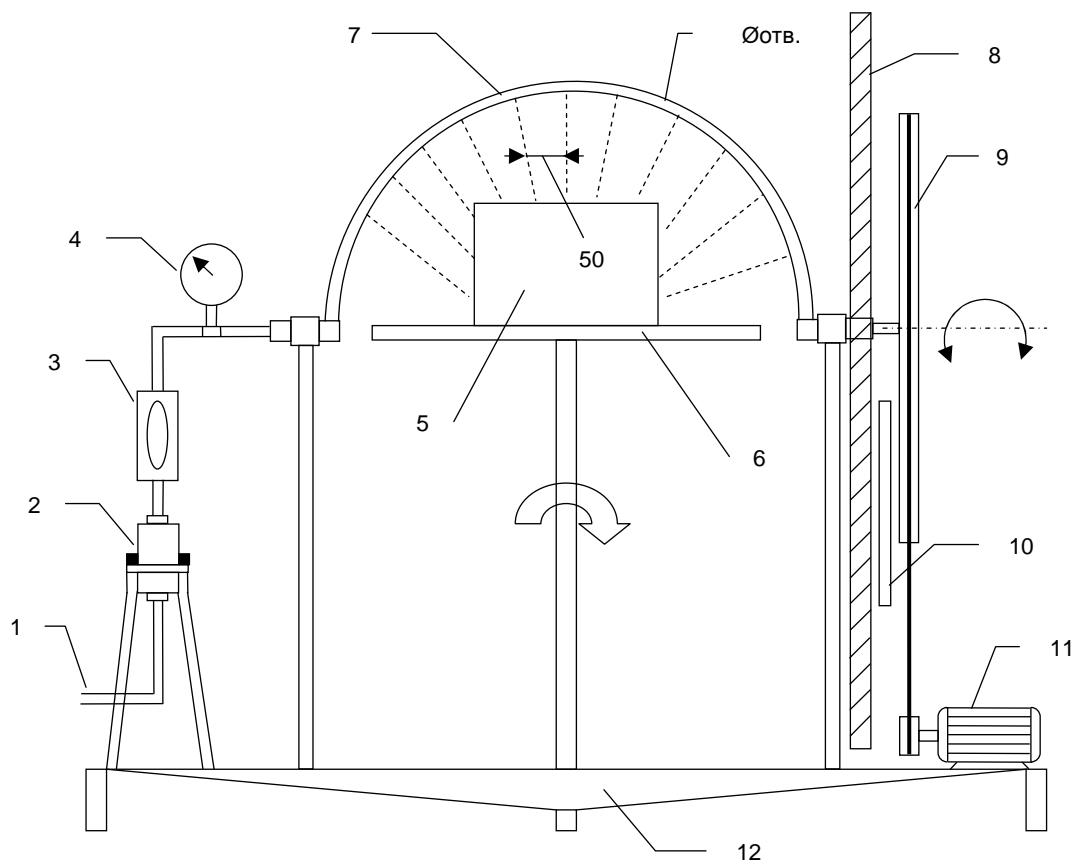


Рис. 3.9. Схема установки для испытаний на внешнее воздействие воды:  
 1 – ввод воды по ГОСТ 18722-73; 2 – фильтр; 3 – ротаметр по ГОСТ 13045-81;  
 4 – манометр по ГОСТ 2405-80 (СТ СЭВ 1641-79); 5 – испытуемая аппаратура; 6 – стол;  
 7 – трубка по ГОСТ 617-72 или ГОСТ 18475-73; 8 – защитный щиток; 9 – шкив;  
 10 – щиток конечных выключателей; 11 – электродвигатель реверсивный  
 по ГОСТ 16264-78Е; 12 – поддон для слива воды

Зона действия брызг должна перекрывать габаритные размеры изделий не менее чем на 30 см, направление падения должно составлять угол  $45^\circ$  с плоскостью расположения изделий.

Температура воды в начальный момент испытаний должна быть ниже температуры изделий на 10 – 15 °С.

Изделия в течение 2 ч подвергают действию брызг с интенсивностью 5 или 3 мм/мин.

Изделия, которые в условиях эксплуатации могут подвергаться непосредственному воздействию брызг, должны быть устойчивы к воздействию, верхнее значение интенсивности которого 5 мм/мин, за исключением изделий, рассчитанных на напряжение свыше 1000 В в исполнениях для умеренного и холодного климата (исполнения У и ХЛ), для которых верхнее значение интенсивности брызг составляет 3 мм/мин.

Испытание изделий водозащищенного исполнения В3 проводят для проверки способности оболочек (кожухов) изделий не пропускать воду при накате волн. Для этого изделия обливают поочередно со всех сторон струей воды из цилиндрической насадки с расстояния 1,5 м от изделия. Давление воды перед насадкой должно быть  $0,2 \text{ МН/м}^2$ , диаметр отверстия насадки 50 – 75 мм. Продолжительность воздействия 15 мин.

Испытания изделий исполнения В4 на водонепроницаемость проводят для проверки устойчивости параметров РЭС после пребывания их в воде. Для этого изделия опускают в воду, имеющую температуру  $20 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , на глубину 0,5 – 1,0 м. Продолжительность воздействия воды должна быть не менее 30 мин.

После испытаний внешние поверхности изделия насухо протирают и вскрывают, чтобы установить отсутствие влаги внутри корпуса.

Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если после испытаний внутри изделия не обнаружено следов воды, параметры соответствуют параметрам и требованиям, указанным в стандартах и ПИ для данного вида (В1, В2, В3, В4) исполнений.

### **3.11. Испытания на ветроустойчивость**

Ветроустойчивостью называют способность РЭС сохранять при воздействии ветра свои характеристики в пределах норм, установленных в стандартах, ТУ или ПИ. Согласно ГОСТ 22261-76 для 4 – 7 групп в ТУ допускается устанавливать требования по ветроустойчивости.

Испытания РЭС 4 – 7 групп на ветроустойчивость проводят следующим образом:

- после измерения в нормальных условиях характеристик, установленных для испытаний данного вида в стандартах и (или) ТУ, изделие устанавливают в рабочем положении в аэродинамической трубе или под вентиляционной установкой, обеспечивающей воздушный поток;
- изделие включают и обдувают воздушным потоком под различными углами (через  $45^\circ$ ) по 5 – 10 мин в каждом положении (в направлении наибольшей парусности продолжительность обдува должна быть 20 мин);
- при воздействии воздушного потока проверяют требуемые характеристики;
- прекращают подачу воздуха и выключают изделие;
- изделие второй раз обдувают воздушным потоком со скоростью не менее 50 м/с под углами через  $45^\circ$  по 5 – 10 мин в каждом положении

(в направлении наибольшей парусности продолжительность обдува должна быть 20 мин);

– после пребывания в нормальных условиях эксплуатации в течение времени, установленного в стандартах или ТУ, изделие включают и по истечении времени установления рабочего режима проверяют требуемые характеристики.

В том случае, когда ветер является фактором, существенно воздействующим на РЭС (например, РЛС, антенны и т.п.), при разработке и испытании РЭС необходимо рассматривать характеристики ветра по ГОСТу.

### 3.12. Испытания на герметичность

Герметичностью называют способность оболочки (корпуса), отдельных ее элементов и соединений препятствовать газовому или жидкостному обмену между средами, разделенными этой оболочкой.

Испытания на герметичность проводят для определения степени герметичности РЭС.

Требования к степени герметичности должны быть определены при разработке конструкции. Степень герметичности должна характеризоваться *потокм газа, расходом или наличием истечения жидкости, падением давления за единицу времени, размером* и другими величинами, приведенными к рабочим условиям по ГОСТ 24054-80 и ГОСТ 20.57.406-81.

Метод испытания на герметичность выбирают в зависимости от назначения РЭС, их конструктивно-технологических и компоновочных особенностей, требований к степени герметичности, а также экономических характеристик испытаний.

Испытания на герметичность включают в технологический процесс изготовления РЭС таким образом, чтобы предшествующие технологические операции не приводили к случайному перекрытию течей.

При невозможности исключить случайные перекрытия течей в технологическом процессе необходимо предусмотреть операции, обеспечивающие освобождение течей от закупорки.

Метод или программа испытаний на герметичность указаны в стандартах, ТУ или ПИ.

В зависимости от рода пробного вещества методы испытания на герметичность подразделяются на две группы – *газовые и жидкостные*. К газовой группе относятся следующие методы испытаний: радиоактивный, манометрический, массоспектрометрический, галогенный, пузырьковый,

ультразвуковой, катодометрический, химический, инфракрасный, параметрический.

К жидкостной группе относятся следующие методы: гидростатический, люминесцентный (цветной), электрический, параметрический.

Реализация указанных методов возможна следующими способами: компрессионным, камерным, вакуумным, капиллярным, обмыливанием, нагреванием, внешней опрессовкой, опрессовкой замкнутых оболочек в камере.

Классификация наиболее распространенных методов испытания на герметичность и их общая характеристика приведены в справочном приложении 2 ГОСТ 24054-80.

Метод должен обеспечивать проведение испытаний в условиях, отвечающих требованиям действующей НТД по технике безопасности и промышленной санитарии.

Испытания герметичности РЭС проводят одним из следующих методов (ГОСТ 5197-70, ГОСТ 20.57.406-81, ГОСТ 24054-80 и публикации МЭК 68-2-17):

- проверка на обнаружение утечки жидкости (гидростатический метод);
- проверка на обнаружение утечки газа масс-спектрометром, в том числе изделий, имеющих свободные внутренние объемы, представляющие собой герметичные уплотненные перегородки (масс-спектрометрический, химический методы);
- проверка на проникновение жидкости и газа (параметрический метод);
- проверка на обнаружение утечки газа, в том числе путем обнаружения утечки воздуха или другого газа из внутренних объемов РЭС при погружении ее в жидкость с пониженным давлением и при повышенной температуре (пузырьковый, катодометрический методы);
- проверка на обнаружение утечки воздуха, подаваемого на изделие под давлением (манометрический метод);
- проверка путем проникновения паров влаги (влажностный метод).

Подготовка РЭС к испытаниям на герметичность предусматривает устранение последствий случайного перекрытия течей после хранения, транспортирования и операций, предшествующих испытаниям.

Для испытаний на герметичность необходимо использовать оборудование, укомплектованное специальными приспособлениями, установочными деталями и калиброванными течами в соответствии с ТУ.

Испытание на герметичность РЭС вакуумным способом (пузырьковый метод) проводят следующим образом. Изделие погружают в ванну с индикаторной жидкостью, находящейся внутри барокамеры, которая должна обеспечивать испытательный режим. Количество жидкости в ванне должно быть достаточным, чтобы исследуемая поверхность была погружена полностью. Температура испытательной жидкости 15 – 35 °С, кинематическая вязкость 25 сСт при 20 °С. Давление в камере снижают до 0,1 – 1 кПа.

Изделие считают выдержавшим испытание, если пузырьки газа не выделяются.

Испытание на герметичность РЭС камерным способом (манометрический метод) проводят следующим образом. Изделие (или партию изделий) помещают в камеру, заполняют ее пробным газом под давлением и выдерживают в течение определенного времени, установленного в стандартах, ТУ и ПИ. До заполнения камеры гелием допускается снижение давления до 0,1 кПа. Изделия выдерживают в течение 30 мин при этом давлении, извлекают из камеры и выдерживают в течение 20 мин при условиях, обеспечивающих удаление гелия, адсорбированного внешними поверхностями. Затем изделия помещают в камеру, соединенную с масс-спектрометром, и измеряют скорость утечки гелия.

Измеренное значение сравнивают со значением скорости утечки гелия, указанным в стандартах и ТУ или ПИ на изделие. Изделие считают выдержавшим испытание, если скорость утечки гелия меньше или равна значению, указанному в стандартах, ТУ или ПИ на изделие.

### **3.13. Испытания на биологические воздействия**

Испытания на биостойкость (биоустойчивость) проводят с целью определения способности РЭС сохранять в условиях воздействия на нее биологических факторов значения показателей в пределах, установленных в НТД. Биологические внешние возмущающие факторы – организмы или их сообщества, оказывающие внешнее воздействие и вызывающие нарушение исправного и работоспособного состояния изделия. В качестве возмущающих факторов могут быть бактерии, грибы плесневые, водоросли, животные (рыбы, черви, земноводные, пресмыкающиеся и млекопитающие). В настоящее время ГОСТами регламентируется учет следующих биофакторов: плесневых грибов, насекомых, грызунов и почвенных микроорганизмов. Наибольшие разрушения РЭС возникают под действием грибковой плесени.



### *Испытания на воздействие плесневых грибов*

*Грибостойкостью* называют способность РЭС противостоять развитию и разрушающему действию грибковой плесени в среде.

Испытания проводят для определения способности изделий или их отдельных блоков и сборочных единиц противостоять развитию грибковой плесени.

Сущность метода испытаний на устойчивость к воздействию плесневых грибов заключается в выдерживании РЭС, зараженных спорами плесневых грибов, в условиях, оптимальных для их развития, с последующей оценкой грибоустойчивости. Необходимость проведения испытаний указывается в НТД или ПИ.

Испытания на грибоустойчивость проводят по ГОСТ 9.048-75 на образцах, которые не подвергались климатическим и механическим испытаниям. Число испытываемых образцов устанавливают в соответствии с НТД и ПИ.

Испытания проводят следующим образом:

- перед испытанием поверхность образцов (изделий, деталей) тщательно протирают (промывают) спиртом-ректификатом. Для протирки используют бязь или марлю. Работу проводят в резиновых перчатках. Затем образцы высушивают, после чего выдерживают в нормальных климатических условиях. При этом должны быть приняты меры, исключающие возможность заражения образцов;

- образцы помещают в *камеру грибообразования или в эксикаторы*. Антисептированные образцы (в том числе и изделия, содержащие отдельные антисептированные детали) испытывают отдельно от неантисептированных. Вместе с образцами ставят контрольную чашку Петри (ГОСТ 23932-79) с питательной средой для контроля жизнеспособности спор грибов;

- образцы, а также контрольную чашку Петри с питательной средой опрыскивают водной суспензией спор грибов из стеклянного пульверизатора с диаметром входного отверстия не менее 1 мм;

- испытания проводят при температуре  $29 \pm 2$  °С и относительной влажности  $95 \pm 3$  % при отсутствии циркуляции воздуха (допускается кратковременное перемешивание воздуха), образцы должны быть защищены от действия искусственного и естественного света;

- через 48 ч проводят осмотр контрольных чашек Петри. Распространение и размножение плесени осуществляется спорами, размер которых не превышает 10 мкм. Если на чашках не наблюдается роста грибов из числа видов, использованных для заражения, то следует провести вторичное опрыскивание изделий жизнеспособной суспензией спор грибов. Срок

испытаний в этом случае следует считать со времени вторичного опрыскивания. Продолжительность испытаний 30 сут;

– после испытания образцы извлекают из камеры и подвергают визуальному осмотру.

Образцы считают выдержавшими испытание, если рост плесени практически не виден невооруженным глазом (при 56-кратном увеличении может наблюдаться слабый рост мицелия и единичное спороношение).

Степень биологического обрастания испытываемых образцов оценивают по 5-балльной системе:

0 – нет роста грибов; на образцах при контроле под микроскопом при 56-кратном увеличении не обнаруживается роста грибов;

1 – очень слабый рост грибов; на образцах при контроле под микроскопом при 56-кратном увеличении наблюдаются единичные проросшие споры;

2 – слабый рост грибов; на образцах при контроле под микроскопом при 56-кратном увеличении наблюдается слабый рост мицелия и единичное спороношение;

3 – умеренный рост грибов; невооруженным глазом на образцах видны очаги плесени;

4 – обильный рост грибов; невооруженным глазом видно сплошное поражение грибами поверхности образцов.

По окончании испытаний образцы должны быть продезинфицированы или уничтожены.

Допустимые показатели грибоустойчивости изделий в зависимости от выполняемых ими функций приведены в ГОСТ 9.048-75

*Испытания на устойчивость материалов к воздействию термитов* в лабораторных условиях проводят в термостатах при температуре  $26 + 0,5$  °С, поддерживая влажность воздуха близкой к 100 %. В соответствии с ГОСТ 9.058-75 испытания образцов материалов на воздействие термитов проводят следующим образом. На образцы материалов, имеющих форму пластин размером 40 × 80 мм, накладывают полоску фильтровальной бумаги так, чтобы она закрывала половину поверхности образца. Смачиваемая водой бумага является источником питания и влаги. Затем на каждый образец устанавливают по два стеклянных садка и прижимают их пружинами или резиновыми кольцами к образцам. В каждый садок помещают по 50 термитов. Для наблюдения жизнеспособности термитов готовят контрольные садки. После этого садки с образцами и контрольные садки устанавливают в термостаты. Продолжительность испытаний 30 сут.

Три раза в неделю визуально учитывают степень повреждения термитами образцов (отверстия, царапины, разрыхление и т.д.) и заменяют погибших термитов равным числом жизнеспособных.

В природных условиях испытания на устойчивость к воздействию термитов проводят на опытных площадках с высокой плотностью термитов на 100 образцах или 20 м ленты каждого материала.

*Оценку устойчивости материалов к воздействию моли* проводят в термостатах при температуре  $24 \pm 1$  °С и относительной влажности воздуха  $65 \pm 8$  % в течение 14 сут. В термостаты помещают садки с образцами и личинками моли. Устойчивость образцов к повреждению молью оценивают по потере ими массы.

*Методика испытаний изделий и материалов РЭС на устойчивость к воздействию грызунов* (ГОСТ 9.057-75) сводится к следующему. Для проведения испытаний используют взрослые особи грызунов. Перед началом испытаний их дрессируют, чтобы приучить доставать пищу, преодолевая преграду. В качестве преграды во время дрессировки используют картон толщиной 2 – 3 мм. При испытании преградой служат испытываемые образцы. Клетки для проведения испытаний изготавливают из каркаса и сетчатых металлических стенок с ячейкой размером не более 5 – 8 мм. В середине клетки имеется перегородка с отверстием  $70 \times 70$  мм, которое закрывается преградой. Продолжительность испытаний составляет 24 ч. По окончании испытаний образцы осматривают, отмечают характер повреждений и их размеры. Образцы считают выдержавшими испытания, если они не повреждены (0 баллов) или на поверхности имеются следы зубов грызунов в виде неглубоких царапин (1 балл).

### **3.14. Специальные виды космических испытаний**

Наибольшее влияние космические условия оказывают на тепловой режим РЭС. Целью испытаний космической РЭС при отработке теплового режима является:

- проверка способности РЭС, их сборочных единиц и элементов в условиях реальных нестационарных градиентов температуры;
- исследование фактически формирующегося поля температуры в отсеках и взаимного влияния температурных полей различных приборов на работоспособность РЭС, выбор оптимальной компоновки приборов и устройств;
- выявление фактических запасов температурных допусков РЭС;
- проверка эффективности работы систем терморегулирования в условиях, максимально приближенных к реальным;

- исследование работы систем терморегулирования в аварийных ситуациях;
- определение ресурса РЭС и ее составных частей;
- исследование температурных деформаций конструкций РЭС.

При моделировании лучистых потоков на низких орбитах учитывается, что из любой точки орбиты планета видна под большим углом (от 140 до 160°) и вследствие этого освещается от 94 до 99,2 % поверхности аппарата; в любой точке орбиты на элементарную площадку, ориентация которой в системе Солнце – Земля сохраняется постоянной, падает одно и то же количество лучистой энергии; направления отраженных от планеты солнечных лучей заключены в пределах телесного угла, под которым видна планета; изменение лучистого потока происходит для всех точек поверхности космического аппарата одновременно; три составляющие падающего лучистого потока (прямое солнечное излучение, отраженное от планеты и собственное инфракрасное излучение планеты) изменяются во времени и пространстве неодинаково.

Моделирование теплового режима РЭС производится в вакуумной камере, где устанавливаются имитаторы Солнца, планеты и орбиты. Для испытаний выбирается полноразмерный космический аппарат со штатной функционирующей аппаратурой, точно такой же, какая должна пойти в полет. На РЭС устанавливается необходимое количество термодатчиков, достаточно полно характеризующих тепловое поле и датчики других величин. Методика испытаний предусматривает следующую последовательность операций. Подготовленное к испытаниям изделие тщательно очищают от всевозможных загрязнений, которые могут ухудшить вакуум. Затем его устанавливают на имитаторе орбиты. К РЭС подключают контрольно-измерительную аппаратуру и проверяют в нормальных условиях работу бортовых систем, контрольно-измерительной аппаратуры и программно-временного устройства, задающего режим в испытательной камере. Запускают систему вакуумирования, а после достижения давления примерно 0,01 Па включают криогенную систему охлаждения экранов. По команде программно-временного устройства, когда в камере установится требуемый режим испытаний, включают имитаторы внешних лучистых потоков, имитаторы орбиты и бортовые РЭС.

Продолжительность эксперимента определяется условиями полета и цикличностью работы РЭС. Параметры испытательного режима (давление, температура и т.д.) передаются на пульт управления с помощью бортовой телеметрической аппаратуры. Испытания на воздействие невесомости на РЭС проводят с использованием средств для создания кратковременной невесомости в лабораторных условиях (башни сбрасывания, падающий

лифт, полет самолета по кеплеровской траектории) или испытательного полета ракеты по баллистическим траекториям для создания длительной невесомости. Кратковременное состояние невесомости достигается в специально оборудованном самолете, выполняющем полет по кеплеровским траекториям. Одна из них, позволяющая при скорости 465 км/ч достигать полной невесомости в течение 12 – 15 с, показана на рис 3.10.

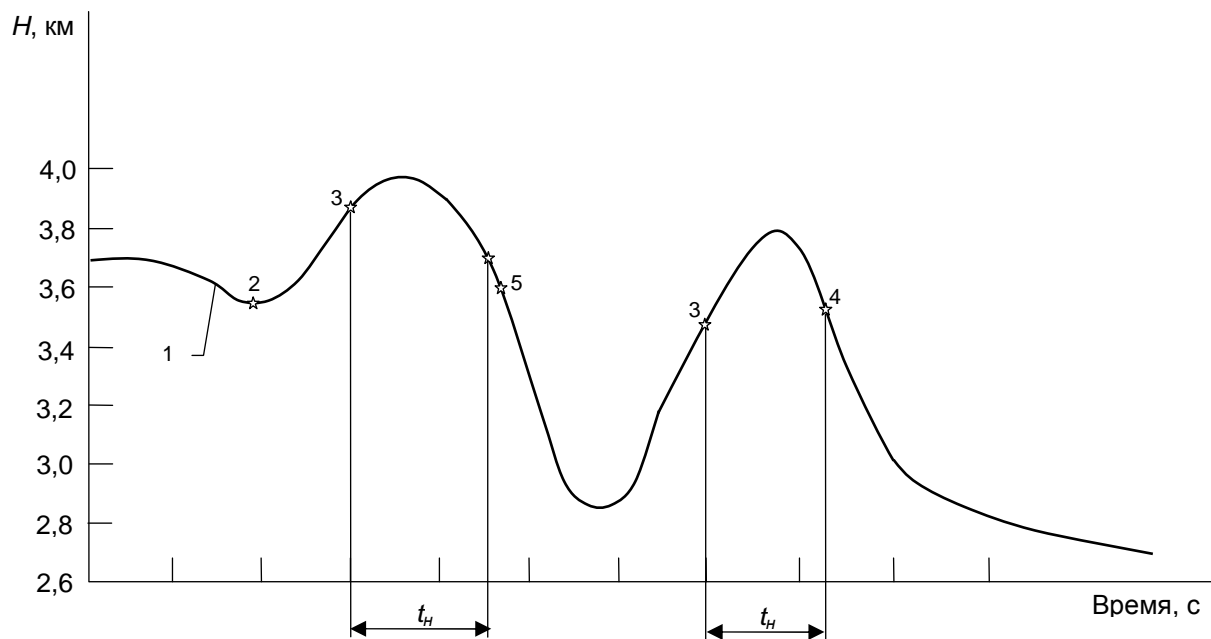


Рис. 3.10. Маневр, выполняемый на самолете с целью имитации состояния невесомости: 1 – пикирование под углом  $10^\circ$ ; 2 – начало восходящей части траектории ( $v = 465$  км/ч, перегрузка  $2,5g$ ); 3 – начало траектории с невесомостью; 4 – конец невесомости; 5 – начало перегрузки ( $t_n$  – время действия невесомости)

Если при скорости 800 км/ч невесомость длится 34 с, то в сверхзвуковом самолете – примерно 4 мин. Для устранения возмущающих механических сил (например, вибрации) изделия и контрольно-измерительные приборы размещают в «плавающих» контейнерах, растяжки которых отстегиваются при достижении состояния невесомости. Другой способ создания невесомости – использование вертикальных башен сброса. Так как создать условия вакуума для устранения сил аэродинамического торможения внутри башни сложно, то применяют падающие капсулированные контейнеры, внутри которых изделия и регистрирующая аппаратура находятся в вакууме. Перед сбросом изделие длительное время может находиться в состоянии покоя, что бывает важно для «успокоения» жидких теплоносителей.

Моделирование потоков твердых частиц при испытании на воздействие микрометеоров в лабораторных условиях можно проводить с помощью ускорителей, работающих на сжатых газах; электромагнитных и водород-

ных источников взрывных ускорителей, в которых используются кумулятивные заряды; плазменных и лазерных ускорителей, электростатических ускорителей различных типов. Линейный ускоритель с трубками дрейфа разгоняет микрометеорные частицы (приблизительно 50 част./с) до скорости 25 км/с. Принцип ускорения заряженных проводящих твердых микрочастиц бегущей электромагнитной волной позволяет получать микрочастицы во всем диапазоне скоростей.

Особенности моделирования *корпускулярного излучения* и его воздействия на изделие при испытании, в отличие от радиационных испытаний РЭС, следующие. Ускорители заряженных частиц должны обеспечивать одновременное облучение исследуемых материалов электронами и положительными ионами, причем электронные и протонные пучки должны иметь равномерную плотность и позволять облучать в вакууме поверхности до  $100 \text{ см}^2$ . Целесообразно изменять энергию частиц в широком диапазоне и использовать установки с непрерывным циклом ускорения частиц (ускорители высоковольтные, электростатические и т.д.)

Желательно иметь возможность преобразовывать моноэнергетические пучки заряженных частиц в пучки со сплошным энергетическим спектром, аналогичным космическому.

Материалы и блоки РЭС работающих в космических условиях, желательно подвергать комплексному воздействию факторов. На рис. 3.11 приведена схема установки, которая позволяет проводить испытания при совместном или раздельном действии факторов *космического пространства*.

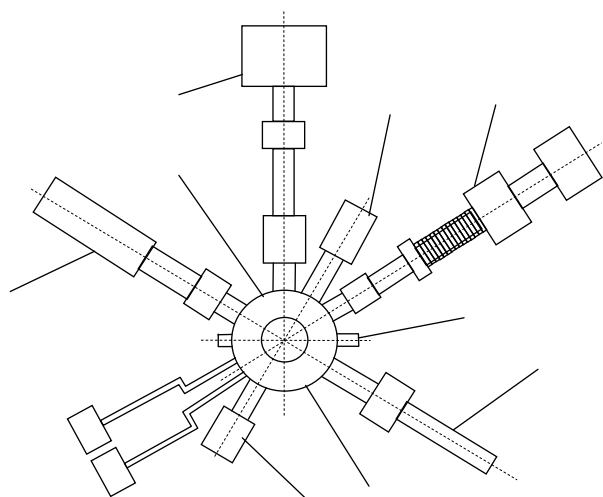


Рис. 3.11. Схема установки для проведения испытаний при совместном или раздельном действии факторов космического пространства:

- 1 – термовакuumная камера; 2 – ускоритель электронов; 3 – имитатор Солнца;
- 4 – ускоритель протонов;
- 5 – масс-спектрометр; 6 – вакуумный фотометр; 7 – криогенный насос;
- 8 – электроразрядный насос;
- 9 – вакуумная разрывная машина

В ее состав входят термовакuumная камера, ускорители электронов и протонов, имитатор Солнца и вакуумная разрывная машина. Объем камеры равен  $0,3 \text{ м}^3$ , вакуум создается до  $2,6 \cdot 10^8 \text{ Па}$ , температура меняется от  $-150$  до  $+200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Глава 4. МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ РЭС НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

### 4.1. Общая структура и методические принципы проведения испытаний

Механические испытания РЭС позволяют выявить наличие дефектов, определить динамические характеристики РЭС, провести оценку влияния конструктивных дефектов на параметры качества РЭС, проверить соответствие параметров РЭС при механическом воздействии требованиям ТУ [10, 16, 17].

Как отмечалось в главе 1, при этом применяются следующие виды механических испытаний:

- на наличие и отсутствие резонансных частот;
- на виброустойчивость;
- на вибропрочность;
- на ударную устойчивость;
- на воздействие одиночных ударов;
- на линейные центробежные нагрузки и акустические шумы.

Исследования различных видов механических испытаний показали, что сочетание вибрационных нагрузок и одиночных ударов оказывает на РЭС наибольшее воздействие, а остальные виды механических воздействий являются дополнительными.

Число видов механических испытаний и их последовательность зависят от назначения РЭС, условий эксплуатации, типа производства. Например, в программу определительных испытаний опытного образца и образцов установочной серии необходимо включать все виды механических испытаний, а для образцов, изготавливаемых в серийном производстве, – только испытания, предусмотренные в стандартах и ТУ на изделия.

Рекомендуется следующая структура методики механических испытаний.

**Подготовка изделий РЭС к испытанию.** Она сводится к изучению технической документации, внешнему осмотру, измерению электрических параметров в соответствии с указанием стандартов и ТУ на РЭС.

**Изучение технической документации.** При подготовке к проведению испытаний следует ознакомиться со следующей документацией:

- программа испытаний (ПИ);
- ТУ или стандарты на изделия;
- инструкция по проведению испытаний;

- инструкция по эксплуатации испытательного оборудования;
- инструкция по обеспечению техники безопасности.

**Внешний осмотр изделий.** При проведении внешнего осмотра к персоналу должны предъявляться следующие требования:

- острота зрения – в пределах от 1 до 0,8 для обоих глаз;
- цветоощущение – нормальное.

Освещенность рабочего места при проведении внешнего осмотра должна быть 50 – 100 лк.

Внешний осмотр изделий проводят либо невооруженным глазом (визуально), либо с применением оптических средств (микроскоп и т.д.) в соответствии с указанием стандартов и ТУ на изделия.

В процессе осмотра особое внимание должно быть уделено таким местам конструкции изделий, в которых возникают наибольшие напряжения и деформации. К таким местам в первую очередь относятся:

- крепления деталей изделия к опорным основаниям (выводы, крепежные лапы, стойки, кронштейны и т.п.);
- резьбовые соединения;
- паяные, сварные, клеесварные и клеевые соединения;
- герметичные соединения и места герметизации;
- крепления пружин, пластин и других упругих деталей, места заделки выводов и т.п.

Требования к внешнему виду изделий и допустимые отклонения устанавливаются в стандартах или ТУ на изделия.

**Измерение электрических параметров изделий.** Измерение электрических параметров и перечень проверяемых параметров изделий и допускаемых отклонений их от норм устанавливаются в стандартах и ТУ на изделия.

При проведении испытаний последовательно на несколько видов воздействий без снятия изделия с приспособления для крепления могут быть проведены дополнительные измерения параметров после установки изделия на приспособление.

**Выбор испытательной установки.** Выбор испытательной установки проводят на основании сравнения параметров испытательного режима (амплитуды, ускорения и перемещения, диапазона частот вибрации, ускорения), а также массы испытываемого изделия и крепежного приспособления с техническими данными вибрационных установок, имеющихся в наличии.

Технические данные вибрационных установок, применяемых при испытаниях, приведены в табл. 4.1.



Таблица 4.1

**Технические характеристики вибрационных установок**

Тип вибрационной установки	Номинальная масса изд., кг	Максимальное ускорение с номинальной нагрузкой	Максимальное перемещение, мм	Толкающая сила, Н	Диапазон частот, Гц	Допустимый коэффициент нелинейных искажений на частоте		Частота первого высокочастотного резонанса, кГц
						%	Гц	
УВЭ-0,5/10000-100М	0,5	1000	6	1750	5 – 10000	10	5 – 10000	4,5
УВЭ-1/5000	1	3000	2	1200	50 – 5000	20	50 – 5000	3,5
УВЭ-1/10000	1	400	6	1200	5 – 10000	10 15	20 – 3000 3000	4,9
УВЭ-5/10000	5	300	7,5	3300	5 – 10000	10 15	20 – 3000 3000	4,0
УВЭ-10/5000	10	450	5	16000	5 – 5000	15	50 – 2000	2,0
УВЭ-50/5-5000	50	250	10	20000	5 – 5000	15 20	60 – 2800 20 – 60, 2800 – 5000	1,9
УВГН-30/300-20	30	100	10 (на частоте 5 – 10 Гц) 5 (на частоте 10-20 Гц)	4000	5-300]	20 (по перемещению)	25 – 300	–
ВЭДС-10-1А	1,9	400*	6,0	10	5 – 5000	8	50 – 5000	–
ВЭДС-100Б	22		7,5	100				
ВЭДС-200А	45	450*	12,5	200				
ВЭДС-1500	300		6	1500				

**Выбор метода испытаний**

Нормы и методы испытаний устанавливаются стандартами и ТУ на изделие в соответствии с ГОСТ 20.57.406-81.

**Выбор средств измерения параметров**

Измерение параметров производят при помощи средств измерения, входящих в комплект оборудования. Диапазон измерения параметров должен соответствовать требованиям технической документации на измерительные приборы.

### **Выбор контрольной точки**

В зависимости от массогабаритных характеристик испытываемого изделия количество одновременно устанавливаемых на столе вибростенда крепежных приспособлений и возможности закрепления на них ВИП контрольная точка может быть:

- на крепежном приспособлении;
- на рабочем столе вибростенда;
- на испытываемом изделии;
- принята условной.

**Выбор приспособления для крепления изделий и способов крепления.** Общие требования, методы проектирования, конструирования и проверки приспособлений для крепления малогабаритных изделий (масса изделий в выборке не более 0,1 кг) изложены в приложении 6 ГОСТ 16962-71. Крепление изделий на приспособлении и приспособления к столу вибростенда производят в соответствии с указаниями ГОСТ 16962-71. Вибрационная установка и виброизмерительная аппаратура должны быть проверены на соответствие требованиям технической документации, о чем должна быть сделана соответствующая запись в формуляре или ином документе, принятом на предприятии.

В процессе эксплуатации должны проводиться регулярные проверки вибрационной установки. Эти проверки бывают двух видов:

- проверка перед началом нового испытания;
- проверка после перерывов в работе установки при продолжении ранее начатых испытаний (ежедневная проверка).

**Проверка вибрационной установки перед началом новых испытаний** включает в себя:

- проверку исправности виброизмерительной аппаратуры;
- проверку исправности вибрационной установки;
- проверку вибрационной установки с установленным изделием.

**Испытательный режим** устанавливается с помощью органов управления вибрационной установкой. Последовательность операций по установке испытательного режима определяется инструкцией по эксплуатации вибрационной установкой.

### **Проведение испытаний**

Изделие должно подвергаться вибрации поочередно в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Если изделие имеет хотя бы одну ось симметрии, рекомендуется проводить испытания в двух направлениях (вдоль и перпендикулярно к оси симметрии). Если конструкция изделия

такова, что преобладающее воздействие на него будет оказывать вибрация в одном направлении, рекомендуется проводить испытание изделия только в этом направлении.

**Контроль режимов испытания** производят по показаниям измерительных приборов, входящих в состав виброизмерительной аппаратуры.

После окончания испытаний производят внешний осмотр, измерение параметров изделий в соответствии с требованиями стандартов и ТУ.

По результатам испытаний оформляют протокол установленной формы.

#### **4.2. Испытания на определение резонансных частот конструкции**

Испытания проводят с целью проверки механических свойств изделий и получения исходной информации для выбора методов испытаний на виброустойчивость, вибропрочность, на воздействие акустического шума, а также для выбора длительности действия ударного ускорения при испытаниях на воздействие механических ударов одиночного и многократного действия.

Значения резонансных частот конструкции, выявленные в процессе испытаний, должны быть указаны в стандартах и ТУ на изделие.

Испытания проводят на отдельной выборке изделий, равной 3 – 5 шт. Вибрационная установка должна обеспечивать получение синусоидальных колебаний во всем диапазоне частот, установленном в стандартах и ТУ на изделия и ПИ для данного вида испытаний. Устройство для определения резонансных частот конструкции должно обеспечивать регистрацию изменения фазы механического колебания на 90°, если принцип его работы основан на сравнении фаз колебаний точки крепления изделия и точки изделия, в котором определяется резонанс.

Испытания проводят в диапазоне частот  $0,2f - 1,5f$ , но не выше  $20000f$ , где  $f$  – резонансная частота, определяемая методом расчета или на основании испытаний изученной аналогичной конструкции. Если неизвестно ориентировочное значение резонансной частоты, то испытание проводят в диапазоне частот 40 – 20000 Гц или до частоты, установленной в стандартах и ТУ на изделия.

Поиск резонансных частот проводят путем плавного изменения частоты при поддержании постоянной амплитуды ускорения. Амплитуда ускорения должна быть минимально возможной, но достаточной для выявления резонанса и не превышать амплитуду ускорения, установленную для испытания на вибропрочность. Амплитуду ускорения рекомендуется выбирать из диапазона  $10 - 50 \text{ м/с}^2 ((1 - 5)g)$ . На этапах конструирования рас-

считывают  $fp$ , и затем ее значение проверяют на вибростенде. Рассмотрим несколько примеров расчета  $fp$  для различных плат:

а) плата с одним закрепленным на ней элементом,

$$fp_{теор} = \frac{1}{2\pi} \frac{k}{m},$$

где  $k$  – коэффициент жесткости вывода элемента;  $m$  – масса элемента;

$$k = \frac{48EJ}{l^3},$$

где  $E = 1,2 - 10$  Н/м – модуль упругости стеклотекстолита;  $l$  – длина вывода элемента;  $J$  – момент инерции;

$$J = \frac{\pi d^4}{64},$$

где  $d$  – диаметр вывода;

б) плата с несколькими закрепленными на ней элементами,

$$fp = \frac{1}{2\pi} \frac{\alpha D}{l^2 m_o},$$

где  $\alpha$  – безразмерный коэффициент;

$$\alpha = 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot K_m \cdot \left(1 + \frac{l^2}{b^2}\right),$$

где  $l$  – длина платы;  $b$  – ширина платы;  $K_m$  – коэффициент жесткости;  $K_m = 0,1 - 0,9$ ;

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \sigma^2)},$$

где  $h$  – толщина платы;  $\sigma$  – коэффициент Пуассона;  $\sigma = 0,22$ ;

$$m_o = (m_\varepsilon + m_n)/bl,$$

где  $m_\varepsilon$  – масса элементов;  $m_n$  – масса платы.

Экспериментальная суммарная резонансная частота  $f_{эксн}$  платы определяется из выражения

$$\frac{1}{f_{\Sigma эксн}^2} = \frac{1}{f_{0 эксн}^2} + \frac{1}{f_{1 эксн}^2} + \frac{1}{f_{2 эксн}^2},$$

где  $f_0^2$ ,  $f_{1 эксн}^2$  и  $f_{2 эксн}^2$  – резонансные частоты комплектующих изделий, закрепленных на плате.

### 4.3. Испытания на наличие резонансных частот конструкции в заданном диапазоне частот

Испытания проводят с целью проверки отсутствия резонансных частот у изделий и их деталей в одном из диапазонов частот, приведенных в табл. 4.2.

Испытания проводят в диапазоне частот от 10 Гц до  $1,1 f_{\text{в}}$ , где  $f_{\text{в}}$  – верхняя частота диапазона, указанного в табл. 4.2, если другой диапазон не указан в стандартах и ТУ на изделия и ПИ.

Испытания проводят в трех взаимно перпендикулярных направлениях по отношению к изделию, если другие указания по выбору направлений не приведены в стандартах и ТУ на изделия и ПИ.

Таблица 4.2

Режимы испытаний на наличие резонансных частот

Верхняя частота диапазона частот, Гц	Степень жесткости
25	I
40	II
100	III

При проведении испытаний проверяют на наличие резонансов все основные детали изделия, у которых возможны резонансы в проверяемом диапазоне частот. Особое внимание уделяют деталям, определяющим структуру изделия и его функциональное назначение.

Поиск резонансов производят путем плавного изменения частоты при поддержании постоянной амплитуды перемещения в контрольной точке ниже частоты перехода и постоянной амплитуды ускорения выше частоты перехода для соответствующей степени жесткости (см. табл. 4.2).

Амплитуда ускорения должна быть минимально возможной, но достаточной для выявления резонанса и не превышающей амплитуды ускорения при испытании на виброустойчивость и вибропрочность.

Амплитуду перемещения рекомендуется выбирать из диапазона 0,5 – 1,5 мм, амплитуду ускорения – 10 – 50  $\text{мс}^{-2}$  ((1 – 5)g), при этом частоту перехода  $f$  в Гц определяют по формуле

$$fp = \sqrt{250J / A},$$

где  $j$  – амплитуда ускорения, g;  $A$  – амплитуда перемещения, мм.

Конкретное значение амплитуды перемещения и ускорения указывают в стандартах и ТУ на изделия и ПИ.

Скорость изменения частоты должна быть такой, чтобы обеспечить возможность обнаружения и регистрации резонансов. Она не должна превышать 1 октаву в минуту.

Изделия считают выдержавшими испытания, если у них отсутствуют резонансы в диапазоне частот, указанном в стандартах и ТУ на изделия и ПИ.

#### **4.4. Испытания на виброустойчивость и вибропрочность**

**Испытания на виброустойчивость** проводят с целью проверки способности изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах значений, указанных в стандартах и ТУ на изделия, в условиях воздействия вибрации.

Испытание проводят одним из следующих методов:

метод 1 – испытание на виброустойчивость при воздействии синусоидальной вибрации;

метод 2 – испытание на виброустойчивость при воздействии широкополосной случайной вибрации. Испытание проводят для изделий, имеющих в заданном диапазоне частот не менее четырех резонансов, если к изделиям предъявлено требование по устойчивости к воздействию случайной вибрации.

##### **Метод 1**

Вибрационная установка должна обеспечивать получение в контрольной точке синусоидальной вибрации с параметрами, установленными для требуемой степени жесткости.

Испытание проводят под электрической нагрузкой, характер, параметры и метод контроля которой должны быть установлены в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ, путем плавного изменения частоты в заданном диапазоне от низшей к высшей и обратно. Для изделий с линейными резонансными характеристиками испытания проводят путем изменения частоты в одном направлении.

Скорость изменения частоты устанавливается равной одной – двум октавам в минуту. Если для контроля параметров изделия требуется большее время, чем то, которое обеспечивается при данной скорости развертки частоты, то допускается устанавливать скорость изменения частоты меньше одной октавы в минуту. При этом скорость изменения частоты должна быть максимальной, но достаточной для обеспечения контроля необходимых параметров.

В диапазоне частот ниже частоты перехода поддерживают постоянную амплитуду перемещения, а выше частоты перехода – постоянную амплитуду ускорения. Режимы испытаний – диапазон частот, амплитуда перемещения, частота перехода и амплитуда ускорения приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

**Режимы испытаний на виброустойчивость при воздействии синусоидальной вибрации**

Степень жесткости	Диапазон частот, Гц	Амплитуда перемещения, мм	Частота перехода, Гц	Амплитуда ускорения, м·с <sup>-2</sup> (g)
I	10 – 35	–	–	5 (0,5)
II	10 – 55 (60)*	–	–	10 (1,0)
III	10-55 (60)*	0,5	32	20 (2,0)
IV	10 – 55 (60)*	0,5	–	–
V	10 – 80	0,5	32	20 (2,0)
VI	10 – 80	0,5	50	50 (5,0)
VII	10 – 150	0,5	50	50 (5,0)
VIII	10 – 200	0,5	5	50 (5,0)
IX	10 – 500 (600)*	0,5	50	50 (5,0)
X	10 – 500 (600)*	1,0	50	100 (10,0)
XI	10 – 2000 (3000)*	1,0	50	100 (10,0)
XII	10 – 2000 (3000)*	2,0	50	200 (20,0)
XIII	10 – 2000	4,0	50	400 (40,0)
XIV	10 – 5000	4,0	50	400 (40,0)

*\*Значения, указанные в скобках, в новых разработках не применяют.*

В процессе испытания проводят контроль параметров изделий. Проверяемые параметры, их значения и метод проверки указываются в стандартах и ТУ на изделие и в ПИ.

Для проверки виброустойчивости рекомендуется выбирать параметры, по изменению которых можно судить о виброустойчивости изделия в целом (например, уровень виброшумов, искажение выходного сигнала или изменение его величины, целостность электрической цепи, нестабильность контактного сопротивления и т.д.).

При обнаружении у изделий частот, на которых наблюдается нестабильность работы или ухудшение параметров, дополнительно проводят выдержку на этих частотах в течение времени, указанного в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ, но не менее 5 мин.

Испытание проводят при воздействии вибрации в трех взаимно перпендикулярных направлениях по отношению к изделию, если другие условия не указаны в стандартах и ТУ на изделие и в ПИ.

В конце испытаний проводят визуальный осмотр изделий и измерение их параметров.

## Метод 2

Вибрационная установка должна обеспечивать получение в контрольной точке широкополосной случайной вибрации с параметрами, установленными для требуемой степени жесткости.

Испытание проводят путем воздействия широкополосной случайной вибрации в режимах, указанных в табл. 4.4.

Продолжительность воздействия вибрации в каждом направлении воздействия определяется временем проверки работоспособности изделия.

Проверяемые параметры, их значения и методы проверки указываются в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ.

Таблица 4.4

**Режимы испытаний на виброустойчивость при воздействии широкополосной случайной вибрации**

Степень жесткости	Диапазон частот, Гц	Среднее квадратичное значение ускорения, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ (g)	Спектральная плотность ускорения, $\text{г}^2\cdot\text{Гц}^{-1}$
Ic	20 – 2000	100 (10)	0,05
IIc	20 – 2000	200 (20)	0,20
III c	20 – 5000	300 (30)	0,20
IV c	20 – 5000	500 (50)	0,50

## Испытания на вибропрочность

Испытание проводят с целью проверки способности изделия противостоять разрушающему действию вибрации и сохранять свои параметры в пределах значений, указанных в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ после ее воздействия.

Испытание проводят одним из следующих методов (выбор метода определяется в зависимости от значения резонансных частот конструкции):

*метод 1. Испытание методом качающейся частоты, в том числе:*

а) испытание методом качающейся частоты во всем диапазоне частот. Данный метод применяют для изделий, у которых резонансные частоты распределены во всему диапазону частот испытаний или не установлены;

б) испытание методом качающейся частоты при повышенных значениях амплитуды ускорения. Этот методом используется в тех случаях,



когда есть необходимость сокращения времени испытаний. Рекомендуется применять для испытания миниатюрных изделий для степеней жесткости XIII, XIV;

в) испытание методом качающейся частоты, исключая диапазон частот ниже 100 Гц. Применяют, если низшая резонансная частота изделия превышает 200 Гц;

г) испытание методом качающейся частоты в области резонансных частот. Применяют для изделий, у которых резонансные частоты находятся в диапазоне частот, соответствующем требуемой степени жесткости;

д) испытание методом качающейся частоты с переносом диапазона частот испытаний в область резонансных частот. Применяют для изделий, у которых низшая резонансная частота превышает верхнюю частоту диапазона, соответствующего заданной степени жесткости;

е) испытания на одной фиксированной частоте. Применяют для изделий, у которых низшая резонансная частота более чем в 1,5 раза превышает верхнюю частоту диапазона, соответствующего требуемой степени жесткости;

*метод 2. Испытание методом фиксированных частот во всем диапазоне.* Допускается применять по согласованию с заказчиком, если невозможно применение других методов;

*метод 3. Испытание путем воздействия широкополосной случайной вибрации.* Применяют для испытания изделий, имеющих в заданном диапазоне частот не менее четырех резонансов, если к изделиям предъявлено требование по прочности к воздействию случайной вибрации.

Конкретный метод испытаний указывается в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ. Значение резонансных частот при выборе метода испытаний принимают на основании измерений на стадии разработки и по справочным данным. Испытаниям на вибропрочность подвергают те же образцы изделий, которые были испытаны на виброустойчивость, если последний вид испытания предусмотрен в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ.

Рассмотрим подробнее содержание перечисленных методов.

*Метод 1, а.* Испытания проводят путем воздействия синусоидальной вибрации при непрерывном изменении частоты во всем диапазоне частот от нижнего значения до верхнего и обратно (цикл качания) по графику, приведенному на рис. 4.1.

Время изменения частоты в диапазоне определяют по рис 4.1, округляя его до ближайших значений, обеспечиваемых системой управления вибрационной установкой.

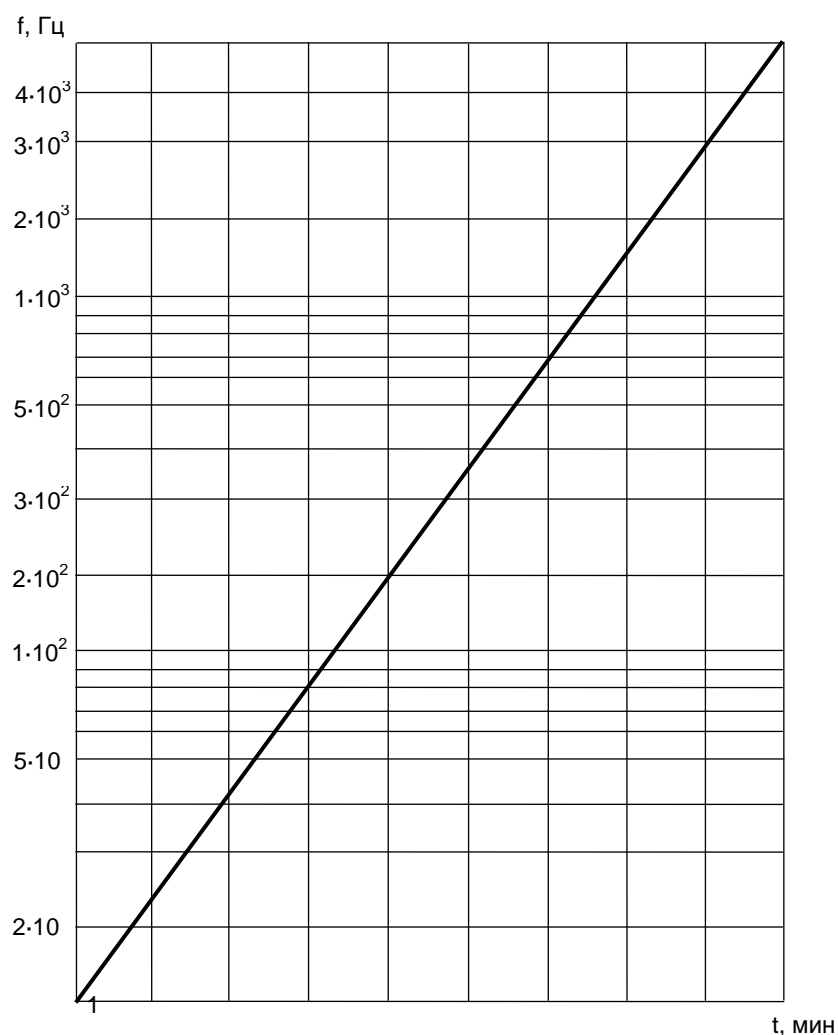


Рис. 4.1. График зависимости времени половины цикла качания от частоты

В диапазоне частот от 10 Гц до частоты перехода поддерживают постоянную амплитуду перемещения, а начиная с этой частоты до верхней частоты заданного диапазона поддерживают постоянную амплитуду ускорения, соответствующую заданной степени жесткости.

Диапазон частот вибрации, амплитуду перемещения, частоту перехода, амплитуду ускорения, расчетное число цикла качания частоты, расчетное число циклов качания и общую продолжительность воздействия вибрации выбирают по табл. 4.5.

Продолжительность испытания определяется общим временем воздействия или расчетным числом циклов качания частоты.

*Метод 1, б.* Вибрационная установка должна обеспечивать получение в контрольной точке синусоидальной вибрации с параметрами, установленными для заданной степени жесткости, с учетом вибрационного значения амплитуды ускорения.

Таблица 4.5

## Режимы испытаний на вибропрочность

Степень жесткости	Диапазон частот, Гц	Амплитуда перемещения, мм	Частота перехода, Гц	Амплитуда ускорения, м·м <sup>-2</sup> (g)	Расчетное время цикла качания, мин	Общая продолжительность воздействия вибрации			
						длительного		кратковременного	
						Время, ч	Расчетное количество циклов качания	Время, ч	Расчетное количество циклов качания
I	10 – 35	–	–	5,0 (0,5)	4	6	90	–	–
II	10 – 55 (60)*	–	–	10 (01,0)	5	6	72	1,5	18
III	10 – 55 (60)*	0,5	32	20 (2,0)	5	6	72	1,5	18
IV	10 – 55 (60)*	0,5	–		5	6	72	1,5	18
V	10 – 80	0,5	32	20 (2,0)	6	24	240	6,0	60
VI	10 – 80	0,5	50	50 (5,0)	6	24	240	6,0	60
VII	10 – 150	0,5	50	50 (5,0)	8	24	180	6	45**
VIII	10 – 200	0,5	50	50 (5,0)	8	24	180	6	45**
IX	10 – 500 (600)*	0,5	50	50 (5,0)	12	48	240	6	30
X	10 – 500 (600)*	1,0	50	100 (10,0)	12	48	240	6	30
XI	10 – 2000 (3000)*	1,0	50	100 (10,0)	15	24	96	6	24
XII	10 – 2000 (3000)*	2,0	50	200 (20,0)	15	24	96	6	24
XIII	100–2000***	–	–	400 (40,0)	9	–	3**	–	–
	10 – 2000	2,0	50	200 (20,0)	15	24	96**	6	24
XIV	10–5000***	–	–	400 (40,0)	11	–	3**	–	–
	10 – 2000	2,0	50	200 (20,0)	15	24	96**	6	24

*Примечание.* Если в стандартах и ТУ на изделия установлена закономерность изменения ускорения в зависимости от частоты, то значение ускорения при испытаниях поддерживают в соответствии с этой закономерностью.

\*Значения, указанные в скобках, в новых разработках не применять.

\*\*При необходимости округляют в большую сторону до ближайшего значения, кратного 2, в зависимости от числа направлений воздействия, соответственно изменяя время испытаний. Для степеней жесткости XII и XIV (ускорение 40 g) выполняют по одному циклу качания для каждого направления воздействия.

\*\*\*Испытания проводят, если изделие не испытывают на вибропрочность методом 102-1 для степеней жесткости XII или XIV.

Испытания проводят по методу *a*, но при амплитудах перемещения и ускорениях, превышающих указанные в табл. 4.5, и сокращенной продолжительности воздействия вибрации. Число циклов качания также уменьшают соответственно сокращению продолжительности воздействия вибрации.

Продолжительность воздействия вибрации  $T_y$  для вибрационного значения амплитуды ускорения  $j_y$  рассчитывают по формуле

$$T_y = T_o \left( \frac{j_o}{j_y} \right)^2,$$

где  $j_o$ ,  $T_o$  – соответственно амплитуда ускорения и продолжительность воздействия вибрации, приведенные в табл. 4.5.

Рекомендуется принимать

$$\frac{j_o}{j_y} = (0,4 - 0,7).$$

При сокращении продолжительности воздействия вибрации путем увеличения амплитуды ускорения следует учитывать диапазон линейности прочностной характеристики изделия, т.е. при повышенном уровне амплитуды ускорения недопустимо проявление качественно новых механизмов отказов, не имеющих места при уровне амплитуды ускорения, приведенном в табл. 4.5.

В стандартах и ТУ на изделие должно быть указано, что испытание проводят в ускоренном режиме.

В диапазоне частот от 10 Гц до частоты перехода амплитуду перемещения увеличивают во столько же раз, что и амплитуду ускорения (в пределах возможности испытательного оборудования) по сравнению с амплитудами перемещения, указанными в табл. 4.5.

*Метод 1, в.* Вибрационная установка должна обеспечивать получение в контрольной точке синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения, соответствующей заданной степени жесткости в диапазоне частот от 100 Гц до верхней частоты, установленной для заданной степени жесткости.

Испытание проводят путем воздействия синусоидальной вибрации при непрерывном изменении частоты в одном из диапазонов частот, приведенных в табл. 4.6, от нижнего значения до верхнего и обратно (цикл качания) и поддержания постоянной амплитуды ускорения.

График изменения частоты приведен на рис. 4.1.

Время изменения частоты определяют по рис. 4.1, округляя его до ближайших значений, обеспечиваемых системой управления вибрационной установкой.

Амплитуду ускорения выбирают по табл. 4.5, а продолжительность воздействия вибрации, расчетное время цикла качания и расчетное количество циклов качания – по табл. 4.6.

Таблица 4.6

**Режимы испытаний на вибропрочность**

Степень жесткости	Диапазон частот, Гц	Продолжительность воздействия вибрации, ч	Расчетное время цикла качания, мин	Расчетное количество циклов качания
IX – X	100 – 500	20	5	240
XI – XII	100 – 2000	15	9	100*
XIII, XIV*	100 – 2000	15	9	100*

\*Для ускорения 20g кратковременная часть испытания проводится по табл. 4.5.

\*\*При необходимости округляют в большую сторону до величины, кратной трем, соответственно изменяя продолжительность воздействия вибрации.

*Метод 1.2.* Вибрационная установка должна обеспечивать получение в контрольной точке синусоидальной вибрации с амплитудой ускорения, соответствующей заданной степени жесткости в области резонансных частот изделия.

Испытание проводят в диапазоне частот  $0,5 f_0 - 1,5 f_{ов}$ , если изделие имеет одну резонансную частоту, или  $0,5 f_{он} - 1,5 f_{ов}$ , если изделие имеет более одной резонансной частоты в заданном диапазоне частот, но выше верхней частоты заданного диапазона, где  $f_0$  – резонансная частота изделия,  $f_{он}$  – нижняя резонансная частота изделия;  $f_{ов}$  – верхняя резонансная частота.

Продолжительность воздействия вибрации  $T'$  при этом методе определяют по формуле

$$T' = 2t_p(T / t_n)$$

или

$$T' = 2t_p N,$$

где  $t_p$  – время изменения частоты от  $0,5 f_0$  до  $1,5 f_0$  или от  $0,5 f_{он}$  до  $7,5 f_{ов}$ , определяемое по рис. 4.1;  $T, t_n$  – общая продолжительность воздействия

вибрации для метода *a* и расчетное время цикла качания соответственно, определяемые по табл. 4.5 для заданной степени жесткости; *N* – расчетное число циклов качания, определяемое по табл. 5 для заданной степени жесткости.

Полученное время *T'* при необходимости округляют до ближайшего значения, кратного шести.

Расчетное время цикла качания уменьшается соответственно изменению диапазона частот испытаний.

*Метод 1, д.* Испытания проводят по стандартам и ТУ на изделия и ПИ и согласовывают их применение с заказчиком.

*Метод 1, е.* Вибрационная установка должна обеспечивать получение в контрольной точке синусоидальной вибрации на заданной частоте с амплитудой ускорения, соответствующей степени жесткости.

Испытания проводят путем воздействия синусоидальной вибрации на любой фиксированной частоте диапазона при ускорении, соответствующем заданной степени жесткости.

Конкретное значение частоты должно указываться в стандартах и ТУ на изделие и в ПИ. Общая продолжительность воздействия вибрации должна определяться числом колебаний:

- $0,5 \cdot 10^7$  колебаний – для степеней жесткости I – VII;
- $2 \cdot 10^7$  колебаний – для степеней жесткости VIII – XII и для испытаний при амплитуде ускорения  $200 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  (20g) для степеней жесткости XIII – XIV;
- $1 \cdot 10^6$  колебаний – для степеней жесткости XIII и XIV при амплитуде ускорения  $400 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  (40g) при каждом направлении воздействия.

Испытательный режим устанавливают в контрольной точке по показаниям средств измерения.

*Метод 2.* Испытания проводят путем воздействия синусоидальной вибрации при плавном изменении частоты в пределах третьооктавных поддиапазонов частот с выдержкой в течение установленного времени на границах третьооктавных поддиапазонов.

Третьооктавные поддиапазоны частот выбирают из следующего ряда частот: 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000 Гц.

Испытание проводят начиная с верхней частоты диапазона частот, соответствующей степени жесткости.

На верхней частоте диапазона частот испытаний проводят выдержку в течении времени, определенного для третьооктавного поддиапазона частот в соответствии с табл. 4.7, затем в пределах каждого поддиапазона производят плавное изменение частоты от верхней к нижней в течение 1 мин, и оставшееся для третьооктавного поддиапазона частот время выдерживают на нижней частоте каждого поддиапазона.

Если верхняя граница диапазона частот не совпадает с одной из вышеуказанных третьооктавных частот, то ее округляют до ближайшей большей частоты третьооктавного ряда.

Общая продолжительность воздействия вибрации по всему диапазону частот и общая продолжительность воздействия вибрации в каждом третьооктавном поддиапазоне частот приведены в табл. 4.7.

Значения амплитуды перемещения, амплитуды ускорения и диапазона частот испытаний выбирают для соответствующей степени жесткости по табл. 4.5.

Таблица 4.7

**Режимы испытаний на вибропрочность**

Степень жесткости	Общая продолжительность воздействия вибрации по всему диапазону частот, ч		Общая продолжительность воздействия вибрации в каждом третьооктавном поддиапазоне частот	
	длительного	кратковременного	длительного, ч	кратковременного, мин
I	7	–	1,0	–
II – IV	9	1,5	1,0	10
V – VI	25	6	2,5	36
VII	26	6,5	2,0	30
VIII	28	7	2,0	30
IX – X	72	6	4,0	20
XI – XII	36	6	1,5	15

*Примечание.* Время выдержки на верхней частоте диапазона частот должно быть  $t_e = t_d/p$ , и на остальных частотах третьооктавного ряда должно быть  $t_e = t_d/p = 1$  (мин), где  $p$  – число направлений воздействия,  $t_d$  – общая продолжительность воздействия вибрации в каждом третьооктавном поддиапазоне частот.

При проведении испытания для изделий с собственными амортизаторами следует избегать совпадения частоты, на которой производят выдержку, с резонансной частотой амортизатора.

*Метод 3.* Испытания проводят путем воздействия на изделие широкополосной случайной вибрации в режимах, указанных в табл. 4.8.

**Режимы испытаний на вибропрочность**

Степень жесткости случайной вибрации	Диапазон частот, Гц	Среднее квадратичное значение ускорения, м·с <sup>-2</sup> (g)	Спектральная плотность ускорения, g <sup>2</sup> , Гц <sup>-1</sup>	Общая продолжительность воздействия вибрации, ч
I с	20 – 2000	100 (10)	0,05	3
II с	20 – 2000	200 (20)	0,20	3
III с	20 – 5000	300 (30)*	0,20	0,05**
	20 – 2000	200 (20)	0,20	3
IV с	20 – 5000	500 (50)*	0,50	0,05*
	20 – 2000	200 (20)	0,20	3

\*Испытания проводятся, если изделие не испытывают на виброустойчивость методом 2 по степеням жесткости III с или IV с.

\*\*Продолжительность воздействия вибрации установлена для одного направления воздействия.

*Примечания:*

1. При замене испытания на широкополосную случайную вибрацию испытанием на синусоидальную вибрацию вместо степеней жесткости I и II используют степени жесткости XI и XII по табл. 4.5 соответственно, а вместо степеней жесткости III и IV с используют степень жесткости XIV.

2. Если низшая резонансная частота изделия находится выше 200 Гц, то испытание проводят начиная от 100 Гц.

**4.5. Испытания на ударную прочность**

Обычно ударные нагрузки возникают совместно с другими видами механических нагрузок и отличаются от них импульсным характером и кратковременностью действия.

*Цель испытаний на ударные нагрузки:*

- проверка способности изделий противостоять разрушающему воздействию ударных нагрузок и, если необходимо, выполнять свои функции в процессе воздействия ударов и после их воздействия;
- оценка конструктивной прочности изделий;
- демонстрация возможности применения изделий в условиях воздействия ударных нагрузок.

Таким образом, испытания проводят с целью проверки способности изделия противостоять разрушающему действию механических ударов многократного действия и сохранять после их действия свои параметры в пределах значений, указанных в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ.

Испытательная установка должна обеспечивать получение механических ударов многократного действия с амплитудой ускорения, соответствующей заданной степени жесткости. Параметры установок для проведения испытаний представлены в табл. 4.9 и 4.10.



Таблица 4.9

**Установки для испытания на воздействие многократных ударов**

Тип	Грузоподъемность, кгс	Число ударов в 1 мин	Максимальное ускорение, g	Длительность удара, мс	Принцип работы	Размеры стола, мм
УУ-500/150	500	20 – 120	150	40	Механический	120×120
УУ-5/1000	5	5 – 80	1000	1,5 – 20		210×250
СУ-1*	50	5 – 80	150	1,5 – 12		285×452
ТТ-50/500	50	10 – 120	500	0,6 – 20		–
УУЭ-2/200	3	20 – 80	200	1,5 – 12	Электродинамический	160
УУЭ-20/200	20	5 – 80	500	1,5 – 40		300
УУЭ-1/6000	1	5	6000	0,1 – 1,0		80

\* При ускорении более 75 g установка имеет большую величину наложенных колебаний, затрудняющую измерение параметров удара.

Таблица 4.10

**Установки для испытания на воздействие одиночных ударов**

Тип	Грузоподъемность, кгс	Максимальное ускорение, g	Длительность удара, мс	Принцип работы	Размеры стола, мм
К-20/1000	20	1000	0,5 – 10	Свободное падение	300×300
К-5/1000	5	1000	0,5 – 10	То же	150×150
К-0,1/10000	0,1	10000	0,12 – 0,1	"-"	50
К-,1/30000	0,1	30000	0,12 – 0,08	"-"	50
К-5/3000	5	3000	0,4 – 11	Пневматический	235
К-2/3000	2	3000	0,4 – 12		То же

Испытание проводят путем воздействия механических ударов многократного действия. Значение пикового ударного ускорения и общее число ударов должны соответствовать указанным в табл. 4.11.

Таблица 4.11

**Режимы испытаний на ударную прочность и устойчивость**

Степень жесткости	Пиковое ударное ускорение, $m \cdot c^{-2} (g)$	Общее число ударов для предусмотренной в стандартах и ТУ на изделия выборки	
		3 шт. и менее	Более 3 шт.
I	150 (15)	12000	10000
II	400 (40)	12000	10000
III	750 (75)	6000	4000
IV	1500 (150)	6000	4000

Длительность действия ударного ускорения выбирают по табл. 4.12 в зависимости от значения низшей резонансной частоты изделия.

Если изделия имеют входящие в их конструкцию встроенные элементы защиты (например, амортизаторы), то при выборе длительности действия ударного ускорения учитывают низшую резонансную частоту самого изделия, а не элементов защиты.

Таблица 4.12

**Режимы испытаний на ударную прочность и устойчивость**

Значение низшей резонансной частоты изделия, Гц	Длительность действия ударного ускорения, мс
60* и ниже	18 + 5
60 – 100*	11 + 4
100 – 200*	6 + 2
200 – 500	3 + 1
500 – 1000	2 + 0,5
Св. 1000	1 + 0,3**

\*Если технические характеристики оборудования не обеспечивают требуемой длительности действия ударного ускорения, то допускается проведение испытаний с длительностью действия ударного ускорения, определяемой по формуле  $t > 300/f_{он}$ , где  $t$  – длительность ударного ускорения, мс;  $f_{он}$  – низшая резонансная частота изделия, Гц.

\*\*Испытание на ударную прочность не проводят.

Изделие подвергают воздействию 20 ударов при каждом направлении воздействия, при этом частота следования ударов должна обеспечивать возможность контроля проверяемых параметров изделия.

Если резонансные частоты изделий не установлены, то длительность действия ударного ускорения указывают в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ.

Форма импульса ударного ускорения должна быть близкой к полусинусоиде.

Испытание проводят при частоте следования ударов 40 – 120 в минуту. Допускаются перерывы в испытании, длительность которых не ограничивается, но при этом общее число ударов должно сохраняться.

Испытание проводят путем действия ударов поочередно в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений по отношению к изделию. При этом общее количество ударов должно поровну распределяться между направлениями, по которым проводят испытание.

#### *Испытания на ударную устойчивость*

Испытания проводят с целью проверки способности изделий выполнять свои функции в условиях действия механических ударов многократного действия.

Испытание проводят под электрической нагрузкой, характер, параметры и метод контроля которой устанавливаются в стандартах и ТУ на изделие и в ПИ.

Испытания проводят путем воздействия ударов поочередно в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений по отношению к изделию.

Длительность действия упругого ускорения выбирают по табл. 4.12.

В процессе испытания проводят контроль параметров изделий.

Проверяемые параметры, их значения и методы проверки указываются в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ.

Для проверки ударной устойчивости рекомендуется выбирать параметры, по изменению которых можно судить об ударной устойчивости изделия в целом (например, уровень виброшумов, искажение выходного сигнала или изменение его значения, целостность электрической цепи, нестабильность контактного сопротивления и т.д.). При совмещении испытания на ударную устойчивость с испытанием на ударную прочность количество ударов должно соответствовать указанному в табл. 4.11. Контроль параметров изделий проводят в конце испытания на ударную прочность при воздействии не менее 20 ударов для каждого направления воздействия.

#### *Испытания на воздействие одиночных ударов*

Испытания проводят с целью проверки способности изделий противостоять разрушающему действию механических ударов одиночного действия и выполнять свои функции после воздействия ударов, а также (если это указано в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ) выполнять свои функции или не допускать ложных срабатываний в процессе воздействия ударов.

Испытательная установка должна обеспечивать получение механических ударов одиночного действия с амплитудой ускорения, соответствующей заданной степени жесткости.

Если в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ указано на необходимость контроля параметров изделий в процессе испытания, то испытания проводят под электрической нагрузкой.

Конкретную форму импульса ударного ускорения устанавливают в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ. Рекомендуется полусинусоидальная форма импульса ударного ускорения.

Значение пикового ударного ускорения выбирают по табл. 39.

Таблица 4.13

**Режимы испытаний на одиночный удар**

Степень жесткости	Пиковое ударное ускорение, м·с <sup>-2</sup> (g)	Степень жесткости	Пиковое ударное ускорение, м·с <sup>-2</sup> (g)
I	200(20)	VIII	30000 (3000)
II	1000 (100)	IX	50000 (5000)
III	1500 (150)	X	10000 (10000)
IV	2000 (200)	XI	20000 (20000)
V	5000 (500)	XII	500000 (50000)
VI	10000 (1000)	XIII	1000000 (100000)
VII	15000 (1500)	–	–

Значения длительности действия ударного ускорения с полусинусоидальной формой импульса ударного ускорения выбирают в зависимости от нижних резонансных частот изделий по табл. 4.14 для степеней жесткости IV и выше, а для степеней жесткости I – III длительность действия ударного ускорения выбирают по табл. 4.12.

Если резонансные частоты изделий не установлены, то длительность действия ударного ускорения принимается по стандартам и ТУ на изделие и ПИ.

Длительность действия ударного ускорения  $\tau$  в м·с с трапецеидальной и пилообразной формой импульса ударного ускорения определяют соответственно по формулам

$$\tau = \frac{n_1 \cdot 10^2}{f_{он}}, \quad (4.1)$$

где значения  $n$  выбирают в диапазоне от 3 до 100;

$$\tau > 300/f_{он}, \quad (4.2)$$

где  $f_{он}$  – нижнее значение резонансной частоты изделия, Гц.

Полученные по формулам (4.1) и (4.2) значения  $\tau$  округляют (в любую сторону) до ближайших значений по табл. 4.12 и 4.14.

## Режимы испытаний на одиночный удар

Значения низших резонансных частот изделий, Гц	Длительность действия ударного ускорения, м·с
500 и выше	$3 \pm 1$
500 – 1000	$2 + 0,5$
1000-2000	$1 + 0,3$
1	2
2000 – 5000	$0,5 + 0,2$
5000 – 10000	$0,2 \pm 0,1$
10000 – 20000	$0,1 + 0,05$
20000 и выше	$0,05 + 0,02$

*Примечания:*

1. Изделия, нижняя резонансная частота которых превышает 2000 Гц, допускается при ударных ускорениях 5000, 10000 и 15000 м·с<sup>-2</sup> (500, 1000 и 1500 g) испытывать при длительности действия ударного ускорения 1,5; 1 и 0,5 м·с<sup>-2</sup> соответственно.

2. Электрические изделия с массой более 2 кг допускается (по согласованию с заказчиком) испытывать при ускорении 10000 м·с<sup>-2</sup> (1000g). При этом длительность действия и форму импульса ударного ускорения не контролируют.

Испытание проводят путем воздействия ударов поочередно в каждом из двух противоположных направлений по трем взаимно перпендикулярным осям изделия (6 направлений), если у изделия невозможно выделить плоскости и оси симметрии. В остальных случаях выбор конкретных направлений воздействия проводится следующим образом:

- при наличии оси симметрии испытания проводят вдоль оси симметрии в двух противоположных направлениях и в любом направлении, перпендикулярном к оси симметрии;

- при наличии одной или нескольких плоскостей симметрии направление воздействия выбирают так, чтобы перпендикулярно к каждой плоскости симметрии испытание проводилось в одном направлении.

Изделия, у которых известно одно наиболее опасное направление воздействия, испытывают только в этом направлении.

Конкретное число направлений воздействия указывается в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ.

Независимо от количества выбранных направлений воздействия пикового ударного ускорения в каждом направлении производят три удара.

Проверяемые параметры, их значения и методы проверки указываются в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ.

#### 4.6. Испытания на воздействие линейного ускорения

Испытания проводят с целью проверки способности изделий противостоять разрушающему действию линейного ускорения и выполнять функции в процессе воздействия линейного ускорения, если это указано в стандартах и ТУ на изделия и ПИ, а также для проверки структурной прочности изделия в процессе производства.

Центрифуга должна обеспечивать получение линейного (центробежного) ускорения, значение которого соответствует требуемой степени жесткости.

Испытания проводят путем воздействия линейного ускорения, значение которого должно соответствовать одному из указанных в табл. 4.15.

Ускорение устанавливают по показаниям средств измерения с допустимым отклонением  $\pm 10\%$  от заданного значения.

Таблица 4.15

Режимы испытаний на линейное ускорение

Степень жесткости	Линейное ускорение, м·с <sup>-2</sup> (g)	Степень жесткости	Линейное ускорение, м·с <sup>-2</sup> (g)
I	100 (10)	VIII	20000 (2000)
II	200 (20)	IX	50000 (5000)
III	500 (50)	X	100000 (10000)
IV	1000 (100)	XI	200000 (20000)
V	2000 (200)	XII	300000 (30000)
VI	5000 (500)	XIII	50000 (50000)
VII	10000 (1000)	XIV	1000000 (100000)

*Примечание.* Испытания по степеням жесткости XII – XIV предусмотрены для проверки структурной прочности изделий в процессе производства.

Время разгона или торможения центрифуги  $\tau_n$  в секунду должно удовлетворять условию:

$$\tau_n \geq 0,3\sqrt{R/j};$$

$$\tau_n \geq 100/n,$$

где  $j$  – линейное ускорение, g;  $R$  – расстояние от центра вращения центрифуги до контрольной точки, см;  $N$  – частота вращения платформы центрифуги, об/мин.

Продолжительность испытания – 3 мин в каждом направлении при испытании с ускорением до  $5000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$  ( $500 \text{ g}$ ), если большее время не требуется для контроля и измерения параметров изделий.

В процессе испытания, если указано в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ, проводят контроль параметров изделий. Проверяемые параметры, их значения и методы проверки указывают в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ.

#### **4.7. Испытания на воздействие акустического шума**

Испытания проводят с целью определения способности изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, указанных в стандартах и ТУ на изделия и ПИ, в условиях воздействия повышенного акустического шума.

Испытание проводят одним из следующих методов:

*метод 1* – испытание путем воздействия на изделие случайного акустического шума;

*метод 2* – испытание путем воздействия на изделие акустического тона меняющейся частоты.

Рассмотрим проведение испытаний этими методами.

*Метод 1.* Испытательная установка должна обеспечивать получение случайного акустического шума в диапазоне частот 10000 Гц при уровне звукового давления, соответствующем требуемой степени жесткости.

Испытание проводят в реверберационной акустической камере. Предпочтительна камера в виде неправильного пятиугольника с размерами, указанными на рис. 4.2. Этот размер должен превышать наибольший габаритный размер изделия не менее чем в два раза и выбираться из следующего ряда: 0,5; 1,25; 3 м.

Крепление изделий или приспособлений с изделиями производят в рабочей зоне камеры на эластичных растяжках (резиновые шнуры, полосы и т.п.). Резонансная частота приспособления, если оно применяется, должна быть не ниже 15 КГц.

Крупногабаритные изделия (наибольший габаритный размер больше 300 мм) рекомендуется устанавливать на раме (столе) с опорой на 3 – 4 амортизатора, при этом резонансная частота системы «изделие – амортизаторы» не должна превышать 25 Гц.

Малогабаритные изделия (наибольший габаритный размер в закреплённом состоянии меньше 40 мм) рекомендуется крепить на приспособлениях, при этом низшая резонансная частота средств крепления изделий должна быть не ниже 15 КГц и не выше 200 Гц.

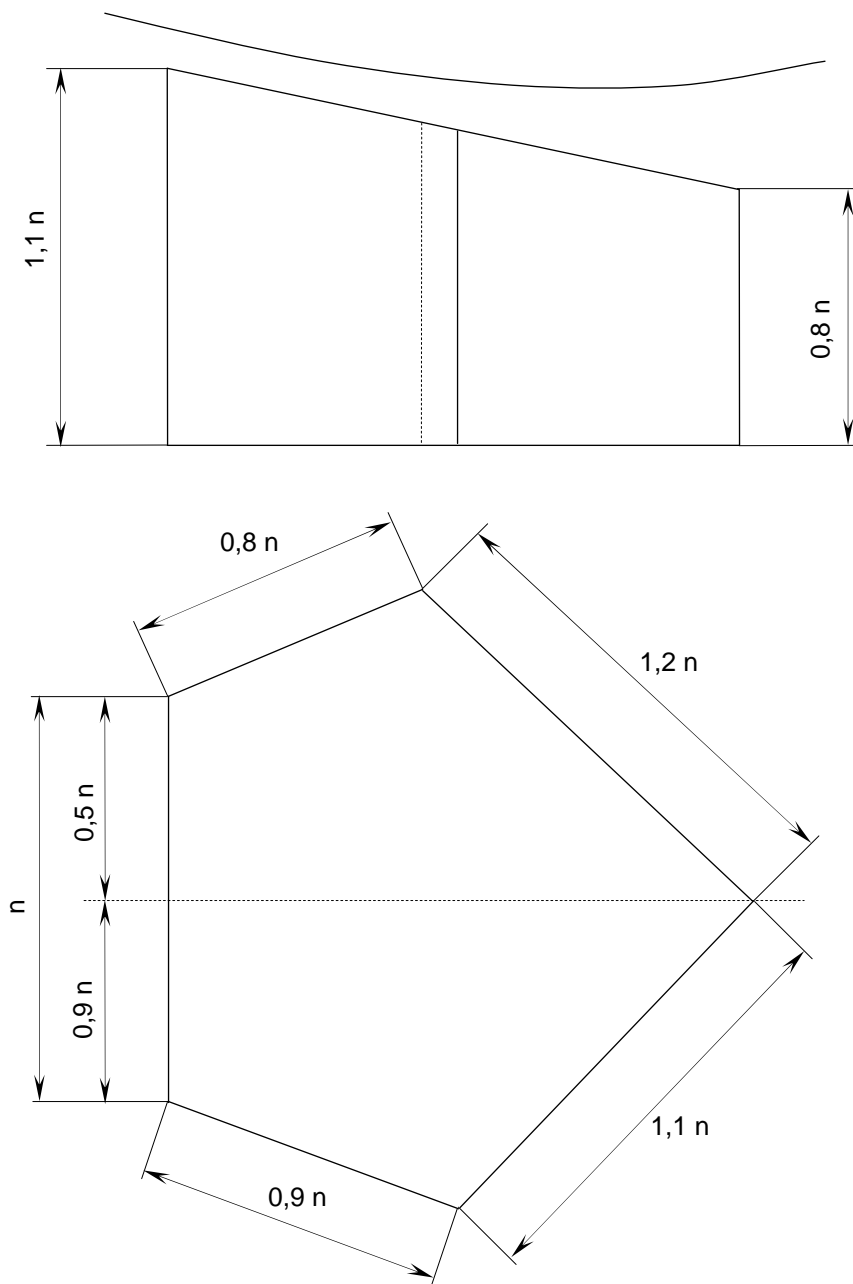


Рис. 4.2. Схема реверберационной камеры

Изделия располагают в средней части реверберационной камеры.

Испытание проводят под электрической нагрузкой путем воздействия акустического шума в диапазоне частот 125 – 10000 Гц, при этом общий уровень звукового давления должен соответствовать указанному в табл. 4.16 с допускаемым отклонением по показаниям рабочих средств измерений +3 дБ.



Режим испытаний на акустический шум

Степень жесткости	Уровень звукового давления, дБ	
	акустического шума	акустического тона меняющейся частоты
I	130	120
II	140	130
III	150	140
IV	160	150
V	170	160

Уровни звукового давления, измеренные в третьооктавных полосах частот, а также допускаемые отклонения должны соответствовать значениям, приведенным на рис 4.3 для соответствующих степеней жесткости. Продолжительность воздействия звукового давления должна быть равна 5 мин, если большее время не требуется для контроля и измерения параметров изделий.

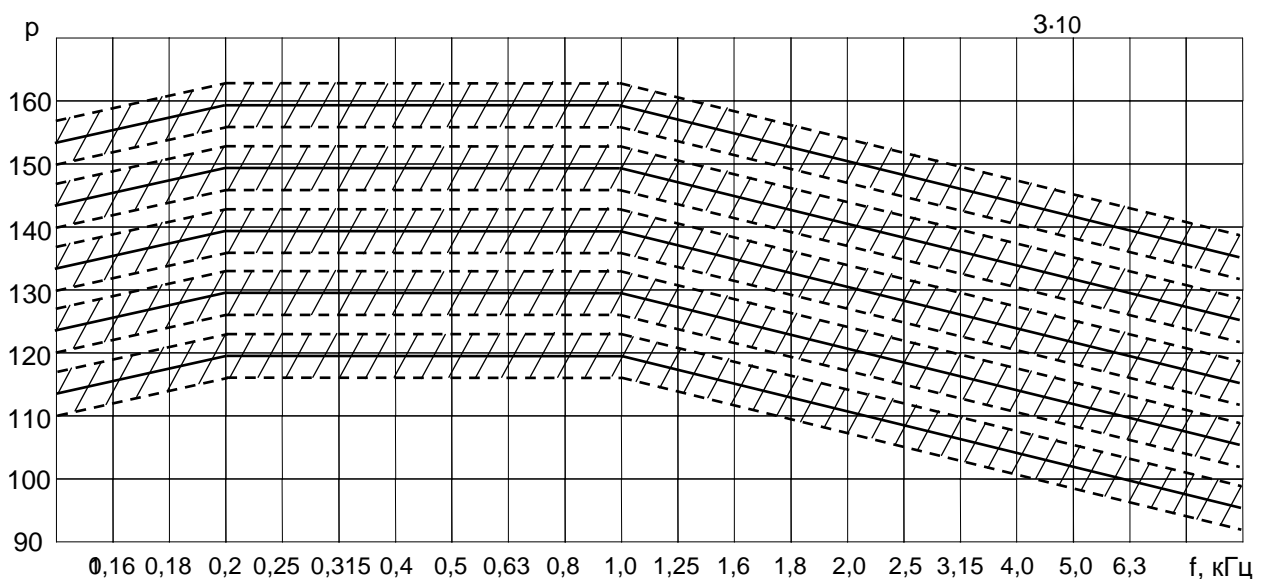


Рис. 4.3. Форма спектра акустического шума (I – V степень жесткости), измеренного в 1/3 октавных полосах частот

В процессе испытания проводят контроль параметров изделий. Проверяемые параметры, их значения и методы проверки указываются в стандартах и ТУ на изделия и в ПИ.

Рекомендуется выбирать такие параметры, по изменению которых можно судить об устойчивости изделия к воздействию акустического шу-

ма в целом (например, уровень виброшумов, искажение выходного сигнала или изменение его значения, целостность электрической цепи, изменение контактного сопротивления и т.д.).

*Метод 2.* Испытательная установка должна обеспечивать получение акустического тона меняющейся частоты в диапазоне частот 125 – 10000 Гц при уровне звукового давления, соответствующем требуемой степени жесткости.

Испытание проводят под электрической нагрузкой путем воздействия тона меняющейся частоты в диапазоне частот 200 – 1000 Гц. Уровень звукового давления должен соответствовать указанному в табл. 4.16. (на частотах ниже 200 и выше 1000 Гц должно быть снижение, равное 6 дБ на октаву относительно уровня на частоте 1000 Гц).

Испытание проводят при плавном изменении частоты по всему диапазону от низшей к высшей и обратно (один цикл) в течение 30 мин, если большее время не требуется для контроля параметров изделий.

В процессе испытаний проводят контроль параметров изделий.

При проведении комбинированных испытаний на климатические и механические воздействия применяется последовательность испытаний, приведенная в табл. 4.17.

Таблица 4.17

**Последовательность механических и климатических комбинированных испытаний**

Испытание	Пояснение
А. Холод В. Сухое тепло Н. Быстрая смена температуры	Климатическое испытание может вызвать механические напряжения, которые могут сделать образец более чувствительным к последующим испытаниям
Е. Удар Ф. Вибрация	Испытания могут вызвать механические напряжения, приводящие к немедленному отказу образца или повышению его чувствительности к последующим испытаниям
М. Атмосферное давление Дб. Влажное тепло (12 + 12-часовой цикл) С. Влажное тепло (постоянный режим) К. Коррозия Л. Пыль и песок	Проведение испытаний может выявить температурные и механические напряжения, возникающие в процессе предшествующих испытаний. Проведение испытаний может усилить результат воздействия температурных и механических напряжений, вызванных предшествующими испытаниями
Проникновение твердых частиц Проникновение воды (например, дождя)	Должны проводиться испытания по МЭК 529 до завершения работы по испытанию Д и по испытанию К в МЭК 68-2

## Глава 5. МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ РЭС

### 5.1. Виды ионизирующих излучений, воздействующих на РЭС

Радиационные испытания (РИ) являются одной из составляющих комплексной системы обеспечения качества РЭС.

В процессе работы РЭС может подвергаться облучению различными ионизирующими излучениями – электронами и протонами радиационных поясов Земли, галактическими и солнечными космическими лучами, гамма-нейтронным излучением ядерных энергетических установок (ЯЭУ), излучением ускорителей частиц, гамма-установок, рентгеновских и других аппаратов.

Под ионизирующим излучением (ИИ) понимают любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию неравновесных электрических зарядов разных знаков. Ионизирующее излучение представляет собой поток заряженных и (или) незаряженных частиц. Ионизирующее излучение состоит из заряженных частиц, энергия которых достаточна для ионизации и возбуждения атомов вещества ( $\beta$ -излучение радионуклидов, пучки протонов и электронов и т.п.).

Излучение, ионизирующее косвенно, состоит из незаряженных (нейтральных) частиц (нейтроны, фотоны), способных вызвать ионизацию вещества через вторичные заряженные частицы, образующиеся в результате взаимодействия первичных частиц с атомами среды. Поля ИИ (плотность потока, энергия, интенсивность) характеризуются определенным пространственным и временным распределением.

В зависимости от характера временных распределений различают непрерывные и импульсные излучения.

Излучение считается непрерывным, если его характеристики за рассматриваемый промежуток времени остаются постоянными.

Под импульсным понимается такое излучение, продолжительность действия которого значительно меньше времени наблюдения.

Под радиационными факторами следует понимать комплекс воздействующих ИИ, которые могут вызывать (или вызывают) нарушение работоспособности РЭС в процессе эксплуатации. В состав радиационных факторов входят излучения, создаваемые ядерным взрывом, ядерными силовыми и энергетическими установками, и излучения, существующие в космическом пространстве (КП).

Ионизирующее излучение ядерного взрыва содержит три компонента – нейтроны, гамма-кванты и рентгеновские лучи [2, 10]. Диапазон изменения основных параметров этих излучений следующий:

- поток нейтронов –  $10^{11} - 10^{15}$  нейтр·см<sup>-2</sup>;
- доза гамма-квантов –  $10 - 10^5$  Р;
- поток рентгеновского излучения –  $1,0 - 10^4$  кал·см<sup>-2</sup>.

Средняя энергия гамма-квантов ЯВ близка к 1 МэВ, а длительность воздействия – менее  $10^7$  с. Диапазон мощностей доз лежит в пределах  $10^8 - 10^{12}$  Р·с<sup>1</sup>.

Спектр нейтронов ЯВ содержит группу нейтронов термоядерного происхождения с энергией около 14 МэВ, нейтроны, близкие к спектру деления, и замедленные нейтроны с энергией менее 0,1 МэВ.

Энергия, образующаяся в ядерных реакциях при ЯВ, передается осколкам деления, ядрам отдачи, заряженным частицам, нейтронам и гамма-квантам. При воздействии ионизирующего излучения ЯВ на РЭС гамма- и рентгеновские кванты распространяются со скоростью света и длительность их воздействия не зависит от расстояния между центром взрыва и облучаемым объектом. Длительность воздействия нейтронов с энергией  $E_n > 0,1$  МэВ лежит в диапазоне  $10^{-4} - 10^{-2}$  с, а длительность воздействия группы нейтронов с энергией 14 МэВ – в диапазоне  $10^{-6} - 10^{-5}$  с.

Радиационная среда, образованная ядерным взрывом, зависит не только от типа и вида взрыва, но и от расстояния до центра взрыва, погодных условий, плотности атмосферы. Амплитудно-временные и спектрально-энергетические характеристики поражающих факторов зависят также и от соотношения гамма- и нейтронной составляющей ионизирующих излучений. Ядерные силовые и энергетические установки все шире применяются на надводных и подводных кораблях и космических аппаратах.

Однако наличие ЯЭУ на борту приводит к тому, что РЭС и персонал подвергаются в течение длительного времени воздействию ионизирующего излучения, состав которого определяется тепловой мощностью реактора, расположением и характером защиты, продолжительностью работы реактора и наличием остаточного гамма-фона реактора в заглушенном состоянии.

Смешанное поле излучений ЯЭУ состоит из мгновенных нейтронов деления с энергией от 0,025 эВ до 1 – 2 МэВ, запаздывающих нейтронов со средней энергией 0,5 МэВ, мгновенных гамма-квантов с энергией 0,5 – 6,5 МэВ, гамма-квантов продуктов деления от 0,1 до 1 – 2 МэВ и захватных гамма-квантов с максимальной энергией до 10 МэВ.

Реальные значения плотности потока нейтронов энергией  $E_n > 0,1$  МэВ и мощности дозы гамма-излучения составляют соответственно  $10^4 - 10^6$  нейтр·с<sup>-1</sup> и  $10^{-3} - 10^{-1}$  Р·с<sup>-1</sup>.

*В околоземном космическом пространстве* существует несколько полей космической радиации, к которым относятся естественные радиационные пояса Земли, галактические и солнечные космические лучи.

Внутренний радиационный пояс Земли состоит из протонов с энергией до 700 МэВ и электронов с энергией от 20 кэВ до нескольких МэВ. Внешний – из электронов с энергией от 10 кэВ до 5 МэВ и протонов – до 60 МэВ.

Пространственно-временное распределение потоков частиц в этих полях в околоземном пространстве зависит от общих процессов, протекающих в Солнечной системе и магнитосфере Земли, и изменяется по своим законам вдоль траектории движения космического аппарата.

Анализ особенностей ионизирующих излучений в возможных условиях эксплуатации реальных объектов показывает, что поля излучений в общем случае описываются пространственными, энергетическими и временными распределениями. При прогнозировании реакции РЭС на воздействие ИИ различного вида необходимо переходить от спектрально-энергетических и временных распределений падающего на объект излучения к величинам, непосредственно характеризующим степень радиационного воздействия ИИ на РЭС.

Количественное описание ионизирующих излучений выражается физическими единицами, которые можно разбить на две группы.

*К первой группе* относятся физические параметры поля ИИ и его воздействия на вещество. К ним относятся: поток и плотность потока частиц (квантов), поглощенная доза и мощность поглощенной дозы, экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы, эквивалентная доза, мощность эквивалентной дозы.

*Вторая группа* величин служит для оценки количественного содержания радиоактивных веществ в материалах. К этим веществам относятся активность нуклида и время, в течение которого число ядер радионуклида уменьшится в два раза (период полураспада).

## 5.2. Радиационная стойкость

К РЭС, работающим в условиях ИИ, предъявляют особые требования по радиационной стойкости.

Под радиационной стойкостью понимают способность РЭС нормально функционировать в процессе и после воздействия ионизирующих излучений. В настоящее время требования по радиационной стойкости предъявляются ко всем объектам вооружения и военной техники, аппаратуре космических аппаратов и аппаратов с бортовыми ядерными энергетическими установками.

Требования по радиационной стойкости, систематизированные в отраслевых стандартах и ГОСТах комплексной системы обеспечения качества РЭС, приведены на рис. 5.1.

Комплексы стандартов устанавливают требования по радиационной стойкости к воздействию ИИ, ЯВ, КП и ЯЭУ и регламентируют методы ее оценки применительно к военной технике, в том числе к космическим аппаратам военного назначения. Традиционными являются три основных способа определения показателей радиационной стойкости РЭС.

*Первый способ* – натурный. В натурном физическом опыте воспроизводят радиационную обстановку, соответствующую реальным условиям применения РЭС. В настоящее время, учитывая запрет на проведение подземных ядерных испытаний, это является невыполнимой задачей.



Рис. 5.1. Система задания требований по обеспечению радиационной стойкости РЭС

*Второй способ – теоретический.* Устанавливают функциональные взаимосвязи между характеристиками ИИ и первичными радиационными дефектами, рассчитывают плотности дефектов ионизации и смещения в материале чувствительного объема РЭС и затем прогнозируют изменение соответствующих свойств материалов РЭС.

*Третий способ – экспериментальный* – использование МУ (моделирующие установки). Экспериментальная база испытательных устройств в настоящее время оснащена комплексом моделирующих установок для раздельного и совместного воспроизведения различных видов ИИ, имеет парк стандартной КИА и современное дозиметрическое обеспечение.

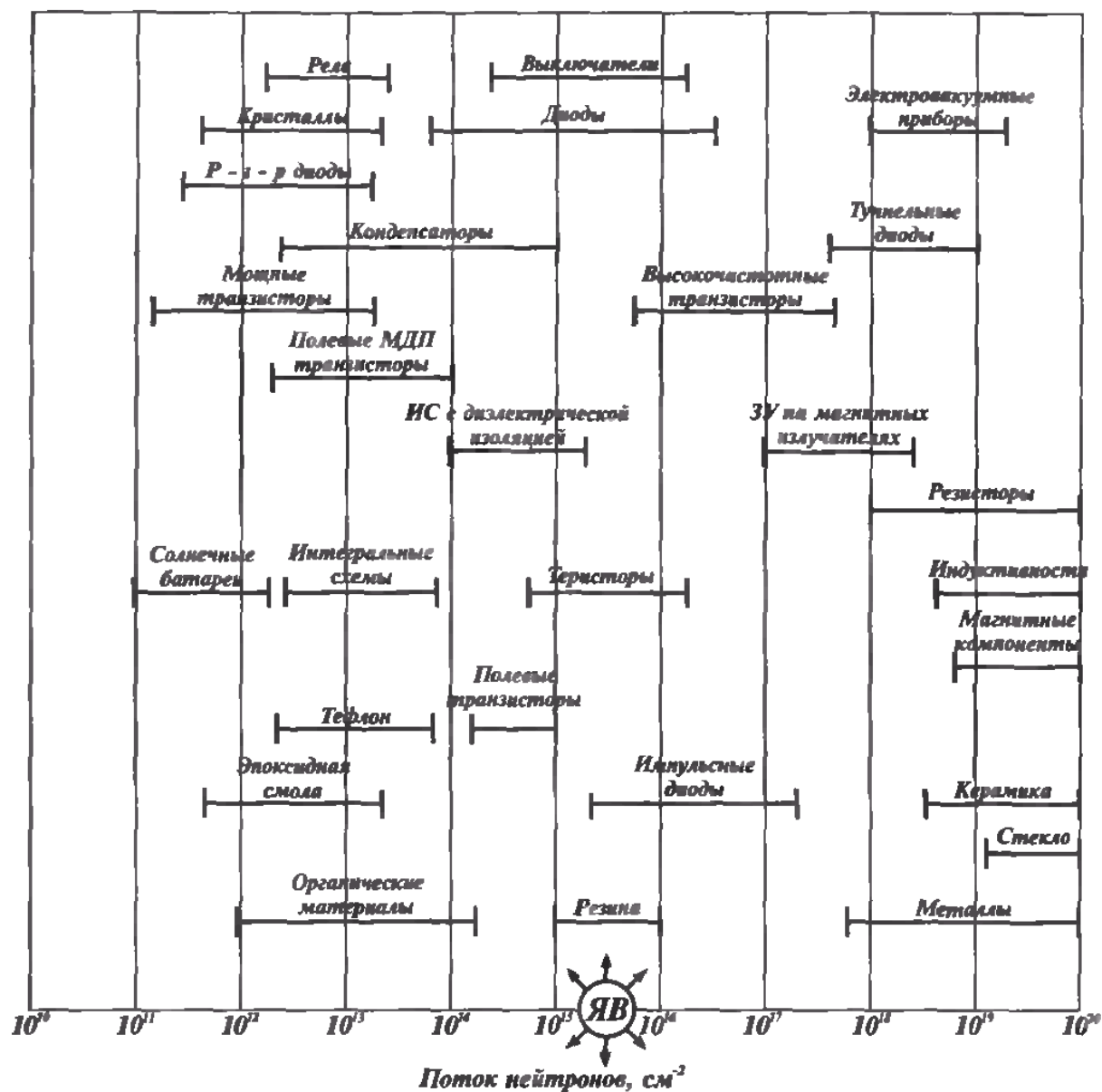
Моделирующие установки, предназначенные для РИ, имеют практически малоизменяемые спектрально-энергетические характеристики и более упрощенные (по сравнению с реальными) амплитудно-временные зависимости интенсивности излучения.

При действии ИИ на РЭС возникают два типа эффекта изменений параметров: *остаточные (долговременные) и переходные (кратковременные)*. Первые, как правило, возникают при воздействии непрерывного ИИ и могут быть обусловлены сложными дефектами кристаллической решетки, вызванными эффектами смещения, появления объемных зарядов при переносе заряда, а также локализованными зарядами при ионизационных явлениях. Переходные (кратковременные) эффекты наблюдаются при воздействии на РЭА импульсного ИИ в течение относительно короткого времени после его прекращения, что связано с возникновением переходных процессов в схемах (появление фототока, модуляции проводимости в полупроводниках при ионизационных эффектах, появление элементарных дефектов, неустойчивых к отжигу, увеличение токов утечки при эффектах смещения и переноса зарядов).

Интенсивность переходных (кратковременных) эффектов может зависеть как от мощности дозы, так и от поглощенной дозы, а остаточные (долговременные) эффекты в основном определяются величиной последней. Материалы и элементы, используемые в РЭС, заметно различаются по этому параметру (рис. 5.2).

Параметры полупроводниковых приборов изменяются под воздействием ионизирующих излучений при потоках нейтронов  $10^{11}$  см<sup>-2</sup>, поглощенных дозах  $10^4$  рад (Si) и мощностях дозы порядка  $10^5$  рад/с (Si) как у биполярных, так и у МДП-транзисторов. Резисторы, конденсаторы и дру-

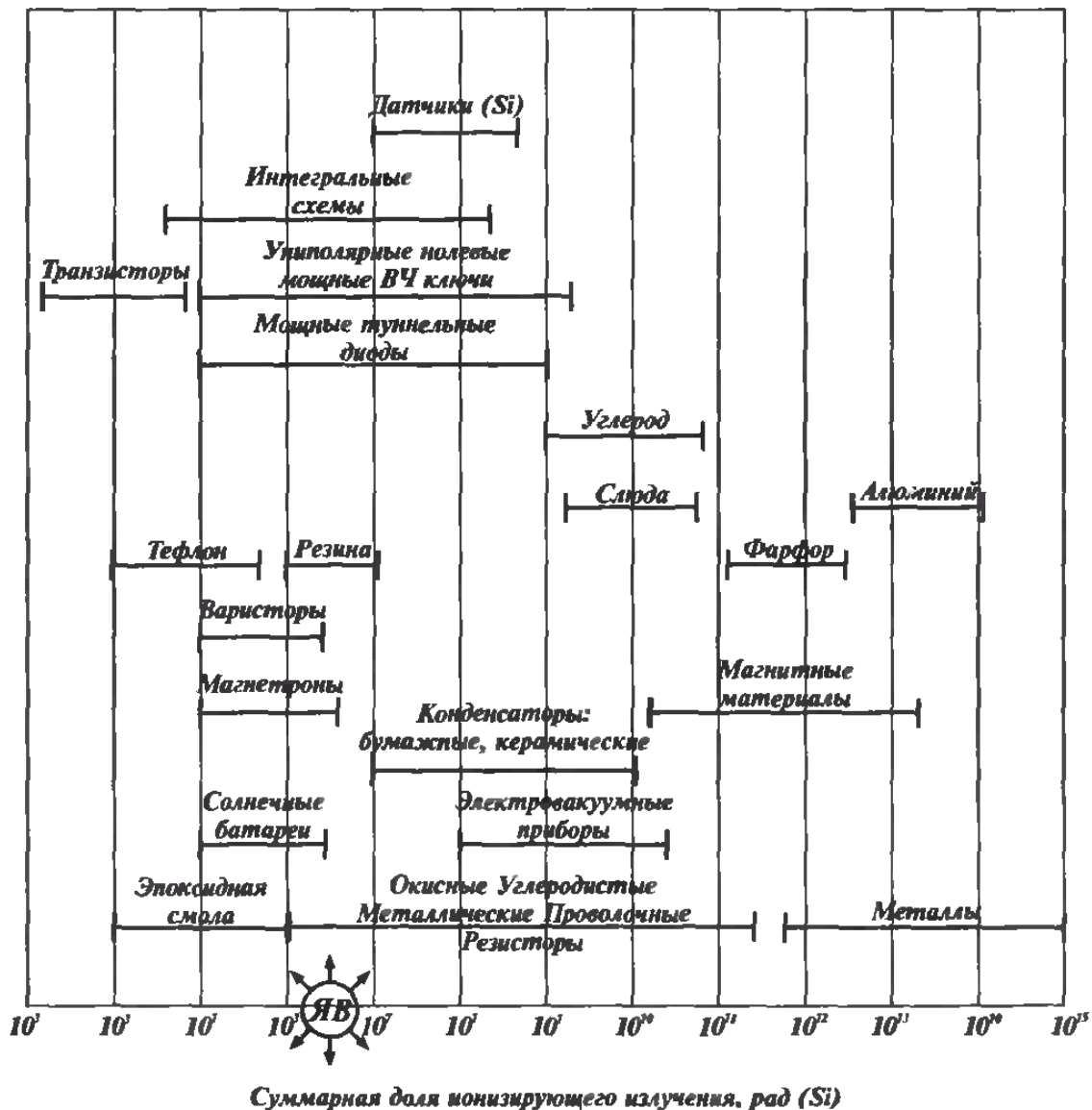
гие пассивные элементы имеют на несколько порядков более высокую радиационную стойкость. По сравнению со схемами на дискретных компонентах ИС обладают более высокой стойкостью по отношению к остаточным радиационным эффектам и менее устойчивы к воздействию импульсного ИИ.



а)

Рис. 5.2. Радиационная стойкость материалов и изделий электронной техники при воздействии нейтронов (а) и суммарной дозы ионизирующего излучения (б) (см. также с. 109)





б)

Окончание рис. 5.2

### 5.3. Особенности воздействия ионизирующих излучений на материалы и элементы РЭС

Воздействие потока быстрых нейтронов на полупроводники приводит к уменьшению ряда качественных показателей.

Рассмотрим изменение этих показателей.

Время жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) –  $\tau_{\Phi}$

Время жизни ННЗ весьма чувствительно к воздействию облучения и определяется скоростью объемной рекомбинации на ловушках и центрах.

Оно определяется по формуле

$$\tau_{\Phi} = \frac{\tau_0}{1 + \tau_0 \Phi K_{\tau}}, \quad (5.1)$$

где  $\tau_{\Phi}$  – время жизни неосновных носителей после облучения;  $\tau_0$  – время жизни неосновных носителей до облучения;  $\Phi$  – интегральный поток излучения;  $K_{\tau}$  – радиационная константа времени жизни неосновных носителей.

Из выражения (5.1) следует, что с ростом интегрального потока излучения время жизни ННЗ монотонно убывает.

*Концентрация свободных носителей заряда –  $n_{\Phi}$*

Радиационные дефекты в некоторых полупроводниковых материалах приводят к уменьшению концентрации свободных носителей заряда, которая в кремнии по мере роста дозы облучения приближается к собственной. Концентрация основных носителей заряда изменяется в зависимости от интегрального потока облучения в широком диапазоне доз по экспоненциальному закону

$$n_{\Phi} = n_0 \exp(-a_n \Phi), \quad (5.2)$$

где  $n_{\Phi}$  – концентрация электронов после облучения;  $n_0$  – концентрация электронов до облучения;  $\Phi$  – интегральный поток излучения;  $a_n$  – постоянный коэффициент, связанный с начальной скоростью удаления носителей.

*Подвижность неосновных носителей заряда –  $\eta$*

Определяется рассеиванием на тепловых колебаниях решетки, ионах примесей, дислокациях и других несовершенствах кристаллов. Радиационные дефекты, как правило, вызывают уменьшение подвижности.

Подвижность электронов и дырок связана с удельным сопротивлением (удельной проводимостью) следующим выражением:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_1} = g(n\eta_n + p\eta_p), \quad (5.3)$$

где  $\sigma$ ,  $\rho$  – удельные проводимость и сопротивление;  $p$ ,  $n$  – концентрация электронов и дырок;  $\eta_n, \eta_p$  – подвижности электронов и дырок;  $g$  – заряд электрона.

*Удельное сопротивление –  $\rho$*

Радиационные дефекты способствуют уменьшению концентрации основных носителей, снижают их подвижность.

Все эти процессы приводят к росту удельного сопротивления полупроводника,

$$\rho_{\Phi} = \rho_0 \exp(K_p \Phi), \quad (5.4)$$

где  $\rho_{\Phi}, \rho_0$  – соответственно удельное сопротивление полупроводника до и после облучения;  $K_p$  – радиационная константа удельного сопротивления полупроводника;  $\Phi$  – интегральный поток.

Выражение (5.4) справедливо для n-типа в интервале  $5 \cdot 10^{13} < n_0 < 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и для p-типа в интервале  $10^{14} < p_0 < 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Уменьшение подвижности и концентрации основных носителей, а также снижение времени жизни неосновных носителей вызывает уменьшение коэффициента передачи базового тока, рост токов утечки и напряжения насыщения биполярного транзистора, а также изменение обратного напряжения диода и емкости перехода. Изменение параметров компонентов ИС влияет на статические и динамические характеристики микросхем. На рис. 5.3, (а) приведены данные по сравнительной устойчивости ИС различных типов к воздействию потока нейтронов.

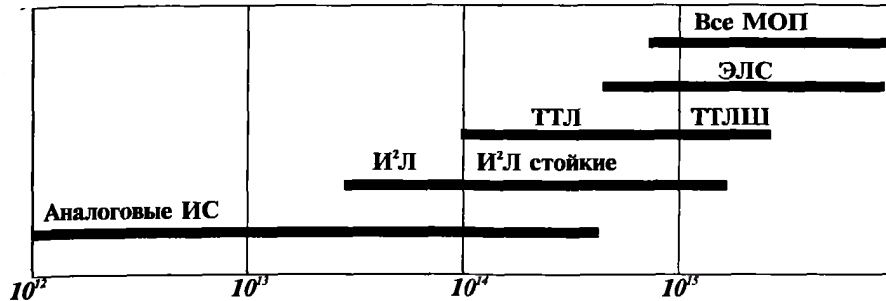
Из рис. 5.3 (а) видно, что ТТЛ ИС сохраняют устойчивость к нейтронному облучению, в широком диапазоне от  $1 - 10^{14}$  до  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^2$ . Наиболее перспективным с точки зрения устойчивости к воздействию потока нейтронов в ТТЛ-технологии является ТТЛШ-схемы, среди биполярных схем ЭСЛ схемы наиболее радиационно-стойкие. У аналоговых ИС диапазон отказов лежит в следующих пределах  $1 \cdot 10^{12}$  до  $1 - 10^m \text{ см}^2$ .

Уменьшение подвижности и концентрации основных носителей, а также снижение времени жизни неосновных носителей, вызывает уменьшение коэффициента передачи базового тока, рост токов утечки и напряжения насыщения биполярного транзистора, а также изменение обратного напряжения диода и емкости перехода. Изменение параметров компонентов ИС влияет на статические и динамические характеристики микросхем. На рис. 5.3, а приведены данные по сравнительной устойчивости ИС различных типов к воздействию потока нейтронов.

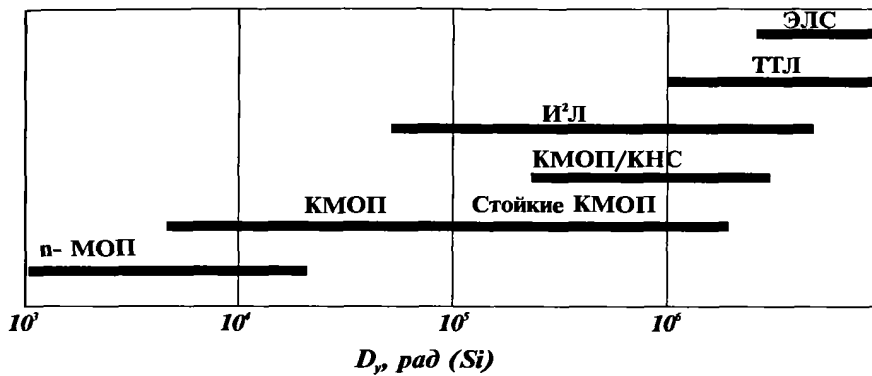
Из рис. 5.3, а видно, что ТТЛ ИС сохраняют устойчивость к нейтронному облучению в широком диапазоне – от  $1 - 10^{14}$  до  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^2$ . Наиболее перспективным с точки зрения устойчивости к воздействию потока нейтронов в ТТЛ-технологии является ТТЛ ИС-схемы, среди биполярных схем ЭСЛ-схемы наиболее радиационно-стойкие. У аналоговых ИС диапазон отказов лежит в пределах от  $1 \cdot 10^{12}$  до  $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

Непрерывное воздействие общей дозы облучения приводит к увеличению токов утечки в биполярных транзисторах, особенно рассчитанных на малые рабочие токи и с большей плотностью переходов. Токи утечки

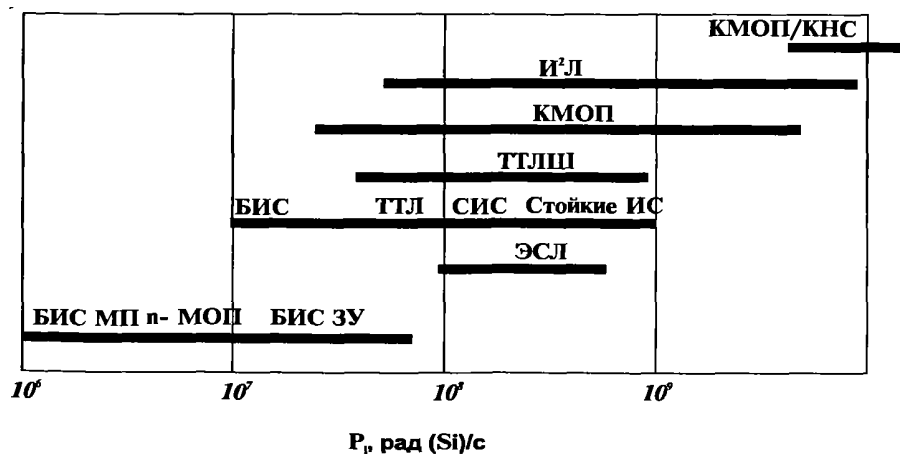
могут достигать значений, при которых происходит отказ биполярных ИС уже при уровнях радиации порядка  $10^5$  рад (Si). Цифровые ТТЛ, И<sup>2</sup>Л ЭСЛ во многих случаях нормально функционируют при дозах  $10^7$  рад (Si) (см. рис. 5.3, б).



$\Phi_n, \text{см}^{-2}$   
а)



б)



в)

————— — диапазон наблюдаемых отказов

Рис. 5.3. Радиационная стойкость ИС, изготавливаемой по различным технологиям, при воздействии потока нейтронов (а), общей дозы излучения (б) и импульсного излучения (в)

Влияние общей дозы облучения на МОП-приборы более существенно, так как в функционировании указанных схем основную роль играют поверхностные эффекты, а ионизирующее излучение приводит к увеличению заряда на поверхности кристалла. ИС с алюминиевым затвором выдерживают дозу  $\sim 10^5$  рад (Si). КМОП/КНС характеризуются повышенной радиоактивной стойкостью, нечувствительностью диэлектрической подложки (сапфира) к радиации и малой площадью р-п-переходов. В настоящее время КМОП/КНС устойчивы к дозе порядка  $10^5 - 10^7$  рад (Si).

*Импульсное воздействие ионизирующего излучения* приводит к появлению фототока в любом обратносмещенном р-п-переходе, например, в коллекторном переходе биполярного транзистора или в р-п-переходах, используемых для изоляции стандартных биполярных ИС. Величина этого фототока зависит от мощности дозы излучения и может достигать значений, достаточных для изменения состояния логической «1» на логический «0» в цифровых ИС.

В момент импульсного воздействия в р-п-переходе образуются избыточные неосновные носители. В результате этого возникает импульс тока, который является преобладающим радиационным эффектом при данном виде ИИ.

Порог устойчивости к возбуждению ИИ зависит от технологии ИС (см. рис. 5.3, в). Для ТТЛ ИС малой и средней степени интеграции он охватывает диапазон от  $10^7$  до  $10^9$  рад/(Si). ЭСЛ-технология имеет устойчивость порядка  $6 - 10^4 - 3 \cdot 10^8$  рад/с (Si) при длительности импульса 20 – 100 м.с.

И<sup>2</sup>Л схемы более устойчивы, чем ТТЛ ИС –  $3 \cdot 10^9$  рад/с (Si).

КМОП/КНС технология наиболее устойчива к данному виду излучения – порядка  $5 \cdot 10^9$  рад/с (Si). На основе проведенного сравнительного анализа и проведенных радиационных испытаний различных ИМС можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее высокой радиационной стойкостью обладают ЭСЛ-схемы, так как в данной технологии используются ВЧ транзисторы, работающие в линейном (ненасыщенном) режиме при больших рабочих токах. Необратимые отказы при непрерывном облучении наблюдаются при потоках быстрых нейтронов свыше  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>, а при облучении j-квантами – при общей дозе порядка  $10^7$  рад (Si). Диапазон уровня отказов ЭСЛ ИС при импульсном облучении лежит в пределах  $1 \cdot 10^8 - 6 \cdot 10^9$  рад/с (Si).

2. Установлено, что устойчивость ТТЛ-схем к потоку нейтронов составляет свыше  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>, а к общей дозе  $\gamma$ -излучения – от  $10^6$  до  $10^7$  рад (Si).

Обратимые отказы при импульсном облучении наблюдаются при уровнях  $10^7$  рад/с (Si).

Далее по стойкости воздействия идут И<sup>2</sup>Л и КМОП/КНС.

Диапазон устойчивости И<sup>2</sup>Л-схем широк:  $10^{13} - 10^{15}$  см<sup>-2</sup> по потоку нейтронов,  $8 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^6$  рад/с (Si) по накопленной дозе и  $8 \cdot 10^7 - 9 \cdot 10^9$  рад/с (Si) по мощности дозы  $\gamma$ -излучения.

3. Для КМОП/КНС-технологии характерны повышенная радиационная стойкость – диапазон устойчивости к воздействию потока нейтронов достигает  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>, обратимые изменения при импульсном  $\gamma$ -облучении наступают при мощности дозы свыше  $5 \cdot 10^9$  рад (Si). Однако КПОМ/КНС ИС обладают сравнительно низкой устойчивостью к накопленной дозе облучения; порог устойчивости составляет  $1 \cdot 10^6$  рад (Si).

Аналоговые схемы по всем трем показателям (Фн, Дж, Рj) более чувствительны к воздействию ИИ, чем цифровые ИС, что обусловлено прежде всего высоким напряжением питания ( $\pm 15$  В против 5В) Диапазон отказов линейных схем лежит в широких пределах:  $1 \cdot 10^{12} - 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> по потоку нейтронов,  $5 \cdot 10^3 - 10^7$  рад (Si) по общей дозе излучения и  $10^8$  рад/с (Si) по мощности дозы облучения. Одним из методов улучшения радиационной стойкости ИМС является использование для их построения элементной базы, имеющей более высокую радиационную стойкость.

#### **5.4. Методика проведения радиационных испытаний**

Принципиальной особенностью проведения радиационных испытаний РЭС на МУ является дистанционный контроль регистрируемых параметров РЭС в процессе и после облучения. При этом для обеспечения дистанционного контроля применяют специализированные измерительные линии, учитывающие специфику моделируемого радиационного воздействия.

Типовая модель организации РЭС на МУ представлена блок-схемой на рис. 5.4.

Испытания проводят следующим образом. Объект испытаний размещают в экспериментальном объеме технологического помещения (ТП), в котором располагается моделирующая установка. Биологическая защита необходима для локализации моделируемых ионизирующих излучений внутри технологического помещения и обеспечения безопасности персонала и КИА, размещающихся в измерительном помещении. Предполагаемый уровень моделируемого воздействия задают с помощью картограмм полей излучения путем выбора расстояния от объекта испытаний до выводного узла МУ.

Конкретное значение достигнутых при испытаниях уровней облучения определяют в процессе испытаний по показаниям дозиметров, тип которых зависит от моделируемого воздействия. Датчики излучения формируют электрический сигнал, характеризующий форму моделируемого воздействия. На импульсных моделирующих установках этот сигнал используется для синхронизации работы контрольно-измерительной аппаратуры и моделирующей установки, а также для определения мощностных характеристик воздействующего фактора.

Реакция РЭС по измерительной линии поступает для регистрации на измерительные входы контрольно-измерительной аппаратуры. С помощью КИА по измерительной линии также задают требуемые электрические режимы РЭС. Наличие необходимой биологической защиты технологического объема ограничивает минимальную длину измерительных линий, что особенно важно учитывать при разработке измерительных методик, которые должны обеспечивать максимальную достоверность получаемых результатов.

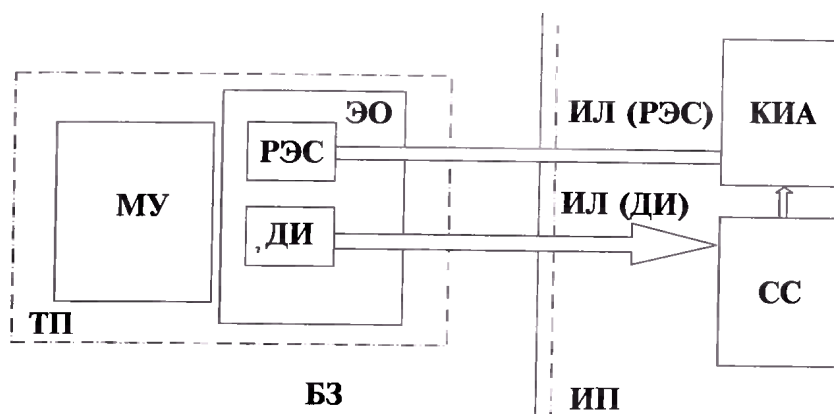


Рис. 5.4. Блок-схема организации дистанционных измерений при проведении испытаний РЭС на МУ:

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| МУ – моделирующая установка;       | ДИ – датчики излучения;                    |
| ТП – технологическое помещение;    | ИП – измерительное помещение;              |
| ЭО – экспериментальный объем;      | КИА – контрольно-измерительная аппаратура; |
| БЗ – биологическая защита;         | СС – система синхронизации;                |
| РЭС – радиоэлектронное устройство; | ИЛ(РЭС) – измерительная линия РЭС;         |
|                                    | ИЛ(ДИ) – измерительная линия ДИ            |

Отличительной особенностью проведения испытаний на импульсных ускорителях является наличие сопутствующих электромагнитных помех достаточно высокого уровня. Поэтому необходимо использовать специальные методы защиты измерительных линий от воздействия электромагнитных наводок.

Основным регламентирующим документом, определяющим требования к радиационной стойкости изделий, являются технические условия или техническое задание на проектирование, в которых определяется принадлежность изделий к той или иной группе применения.

Принадлежность изделий к определенному классу РЭС устанавливается исходя из общности функционального назначения и конструктивно-технологических признаков изделий, определяющих основные подходы к оценке показателей радиационной стойкости изделий в пределах данного класса. Например, существуют типовые методики испытаний биполярных транзисторов малой мощности, СВЧ-приборов, биполярных и КМОП ЦИС и др. Каждая типовая методика имеет установленный срок действия и периодически перерабатывается и дополняется в соответствии с изменением конструктивно-технологических признаков изделий, совершенствованием измерительных методик и разработкой более совершенных методов расчетно-экспериментальной оценки показателей стойкости. Типовая методика содержит следующие разделы:

- общие положения;
- описание объекта;
- перечень контролируемых параметров;
- требования по стойкости к излучениям;
- моделирующие установки;
- нормы, состав и последовательность испытаний;
- порядок определения выборки РЭС;
- методика обработки результатов;
- оценка соответствия РЭС заданным требованиям.

*В разделе «Общие положения»* указывают область применения типовой методики испытаний, порядок разработки, согласования, утверждения и изменения, дату введения в действие и срок действия этой методики.

*В разделе «Описание объекта испытаний»* дают его критическую характеристику и приводят данные его физико-топологического состава, элементного состава, конструкционных материалов и т.д.

*В разделе «Перечень контролируемых параметров»* должны содержаться:

- обоснование выбора каждого контролируемого параметра в качестве критериального;
- структурные схемы измерения каждого контролируемого параметра с учетом специфики дистанционных измерений. Здесь же указывают-



ся типы контрольно-измерительной аппаратуры, используемый диапазон частот, ожидаемые амплитуды измеряемых сигналов, тип и длины коммуникационных линий, волновое сопротивление, сопротивление нагрузки. Дается оценка погрешности измерения контролируемых параметров;

– порядок расчетно-экспериментальной оценки величин электрических токов и потенциалов, возникающих в процессе облучения изделия, дополнительной оснастки, коммуникационных линий, а также помех в контрольно-измерительной аппаратуре.

*В разделе «Требования по стойкости к излучениям»* приводятся методики расчета радиационных эффектов в различных видах РЭС исходя из требований НТД (ГОСТ, ТУ).

Приводятся методики расчета аналитических и графических зависимостей от времени и мощностей поглощаемых доз ИИ, затраченных на ионизацию и структурные повреждения в активных элементах РЭС, а также сами расчетные значения этих доз. Зависимости находят исходя из требований ТЗ(ТУ), амплитудно-временных и спектрально-энергетических характеристик полей ИИ в условиях применения, а также с учетом последовательности и комплексности воздействия ионизирующих излучений.

Для рентгеновского, электронного, протонного и других слабопроникающих излучений приводят методики расчета значений минимальной и максимальной величин поглощенных доз в активных элементах исходя из направления потока излучений, падающих на прибор, и его конструктивных особенностей.

Приводятся данные по изменению электрической прочности изделий при совместимости воздействий ионизирующих излучений и электрических напряжений.

Экспериментальное определение показателей радиационной стойкости проводят на МУ с аттестованными амплитудно-временными и спектрально энергетическими характеристиками. Состав и последовательность испытаний определяют исходя из объема требований, предъявляемых к радиационной стойкости конкретных объектов.

*«Моделирующие установки»* – это источники радиационных воздействий, имеющих единую физическую природу и близкие характеристики с радиационными факторами, воздействующими в реальных условиях эксплуатации.

Моделирующие установки достаточно подробно описаны в специальной литературе. Рассмотрим особенности, принцип действия и технические характеристики МУ с точки зрения организации и проведения радиационных испытаний РЭС. В соответствии с качественными различиями амплитудно-временных и спектрально-энергетических характеристик ИИ различают импульсные моделирующие установки для воспроизведения составляющих ИИ ЯВ и установки статические (для моделирования ИИ ЯЭУ и КП).

Импульсные ядерные реакторы, импульсные источники излучения и установки статического гамма-излучения используют для моделирования воздействия ИИ ЯВ на РЭС.

По своим предельным параметрам МУ позволяют получать в импульсе в небольших объемах потоки нейтронов спектра деления до  $10^{14} - 10^{15}$  нейтр·см<sup>-2</sup> за время  $10^{-4} - 10^{-3}$  с, мощности дозы гамма-излучения – до  $10^{11} - 10^{12}$  рад с<sup>-1</sup> при длительности  $10^{-8} - 10^{-9}$  с.

*Раздел «Нормы, состав и последовательность испытаний»* определяет методику испытаний исходя из требований к стойкости, задаваемых в ТЗ (ТУ), характеристик ИИ, выбранных для испытаний МУ, а также в зависимости от типа РЭС.

Если не оговорено в ТЗ (ТУ), *то количество выборок* должно соответствовать составу испытаний.

Для оценки стойкости РЭС приводят *методики обработки результатов*, позволяющие рассчитать необходимые параметры по результатам измерений, методики прогнозирования и методики обработки результатов для определения вероятного изменения критериальных параметров в условиях применения. Состав этих методик определяет разработчик изделия по согласованию с заказчиком, исходя из целей испытаний.

*В разделе «Оценка соответствия РЭС заданным требованиям»* оценивается стойкость РЭС к воздействию ионизирующих излучений. По результатам проведения испытаний изделие считается соответствующим этим требованиям, если во время и после воздействия излучений параметры всех РЭС выборки находятся в пределах норм, установленных в ТЗ (ТУ) для всех рабочих режимов и во всем рабочем диапазоне температур.

## Глава 6. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РЭС

### 6.1. Основные термины и определения

**Надежность** – свойство объектов сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

**Система** – объект, представляющий собой совокупность элементов, взаимодействующих в процессе выполнения определенного круга задач и взаимосвязанных функционально.

**Элемент системы** – объект, представляющий собой простейшую часть системы, отдельные части которого не представляют самостоятельного интереса в рамках конкретного рассмотрения.

**Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки. Это свойство распространяется как на период использования объекта по назначению, так и на период хранения и транспортировки.

**Долговечность** – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

**Ремонтопригодность** – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, к восстановлению работоспособности и исправности в процессе технического обслуживания и ремонта.

**Сохраняемость** – свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования.

**Работоспособное состояние** – состояние объекта, при котором значение всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Неработоспособное состояние** – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

**Предельное состояние** – состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо, либо восстановление его

работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Признаки (критерии) предельного состояния устанавливаются нормативно-технической и (или) конструкторской документацией.

**Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Признак или совокупность признаков неработоспособного состояния объекта устанавливается в нормативно-технической и (или) конструкторской документации.

Восстанавливаемый объект – объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях.

**Невосстанавливаемый объект** – объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях. Например, радиоаппаратура на непилотируемом спутнике связи относится к невосстанавливаемой – в случае отказа она не может быть заменена. Эта же радиоаппаратура на пилотируемой космической станции относится к восстанавливаемой – отказавшие блоки могут быть заменены исправными (резервными).

**Показатель надежности** – техническая характеристика, количественным образом определяющая одно или несколько свойств надежности объекта. Показатель надежности может иметь размерность (например, среднее время наработки до отказа в часах) или не иметь ее (например, вероятность отказа). **Наработка** – продолжительность или объем работы объекта. Объект может работать непрерывно или с перерывами. В последнем случае учитывается суммарная наработка. Нарработка может измеряться в единицах времени, единицах выработки (кубометрах, гектарах, тоннах), циклах и других единицах. В частности, при испытаниях РЭС различают суточную, декадную, месячную наработку, наработку до первого отказа, наработку между отказами и т.д.

**Технический ресурс** – наработка объекта от начала его эксплуатации до достижения предельного состояния. Технический ресурс может включать в себя средние и капитальные ремонты, число которых указывается в нормативно-технической или конструкторской документации.

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала или возобновления после среднего или капитального ремонта до наступления предельного состояния.

**Срок сохраняемости** – календарная продолжительности хранения и (или) транспортирования объекта в заданных условиях, в течение и после которой сохраняются значения установленных показателей в заданных пределах.

## 6.2. Характеристики отказов

Отказы по характеру проявления подразделяются на внезапные и постепенные. Признаком внезапного отказа служит скачкообразное изменение одного или нескольких определяющих параметров объекта, а постепенный отказ – медленное, постепенное изменение параметров. Постепенные отказы возникают в результате процессов старения и износа, развития скрытого повреждения, интенсивного воздействия внешних факторов. При внезапных отказах количественные изменения параметров перерастают в скачкообразное их изменение.

Классификация отказов приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

**Классификация отказов**

Признак классификации	Вид отказа
1. Характер изменения контролируемого объекта до момента возникновения отказа	Внезапный Постепенный
2. Возможность последующего использования объекта после устранения отказа	Полный Частичный
3. Связь между отказами	Независимый Зависимый
4. Устойчивость работоспособности	Устойчивый Самоустраняющийся
5. Наличие внешних проявлений отказа	Очевидный (явный)
6. Причина возникновения отказа: при конструировании при изготовлении при эксплуатации	Конструкционный Производственный Эксплуатационный
7. Природа (происхождение) отказа	Естественный Искусственный

Отказы подразделяются также на независимые и зависимые.

**Независимый отказ элемента** – отказ элемента объекта, не обусловленный отказами других элементов объекта.

**Зависимый отказ элемента** – отказ элемента объекта, обусловленный отказами элементов объекта.

**Конструкционный отказ** – отказ, возникающий вследствие ошибок, допущенных при конструировании объекта, или несовершенства примененных разработчиками методов конструирования.

**Производственный отказ** – отказ, возникающий вследствие нарушения или несовершенства технологического процесса изготовления объекта или комплектующих изделий.

**Эксплуатационный отказ** – отказ, возникающий вследствие нарушения установленных правил эксплуатации или вследствие влияния непредусмотренных внешних воздействий.

### 6.3. Показатели надежности

Под показателями надежности понимаются количественные характеристики одного или нескольких свойств, составляющих надежность РЭС. Показатели называются единичными, если они характеризуют какое-либо одно свойство надежности, и комплексными, если они относятся к нескольким свойствам надежности.

На испытания обычно отбираются несколько однотипных РЭС, фиксируются их отказы и время наработки до появления отказа. В зависимости от функций, выполняемых РЭС, они подразделяются на *невосстанавливаемые* и *восстанавливаемые*. Как правило, процесс восстановления РЭС характерен для сложных и многофункциональных систем. При этом для показателей надежности используются две формы представления: *вероятностная* и *статистическая*. Вероятностная форма применяется при аналитических оценках надежности, а статистическая – при экспериментальных исследованиях или испытаниях.

Рассмотрим наиболее часто применяемые при испытаниях показатели надежности РЭС.

### 6.4. Невосстанавливаемые РЭС

1. Вероятность безотказной работы РЭС в интервале времени от 0 до  $t_{cp}$  определяется следующими параметрами:

а) вероятностное определение

$$P(0, t_{cp}) = P(t_{cp}) = P\{T_1 \geq t_{cp}\} = 1 - F_1(t_{cp}), \quad (6.1)$$

где  $T_1$  – случайная наработка РЭС до первого отказа;  $F(t_{cp})$  – распределение времени до первого отказа.

Таким образом,  $P(t_{cp})$  – вероятность того, что объект проработает безотказно в течение заданного времени, начав работать в момент времени  $t = 0$ .

б) статистическое определение

$$P(t_{cp}) = N(t_{cp})/N(0) = 1 - n(t_{cp})/N(0), \quad (6.2)$$

где  $N(t_{cp})$  – количество работоспособных РЭС к моменту времени  $T_{cp}$ ;  $N(0)$  – количество РЭС, поставленных на испытание в момент  $t = 0$ ;  $n(t_{cp})$  – число РЭС, отказавших к моменту времени  $t_0$ .

2. Вероятность отказа объекта в интервале времени от 0 до  $t_{cp}$  определяется как дополнительная к вероятности безотказной работы, т.е.

$$Q(t_{cp}) = 1 - P(t_{cp}), \quad (6.3)$$

и

$$\hat{Q}(t_{cp}) = 1 - \hat{P}(t_{cp}). \quad (6.4)$$

Сумма вероятностей безотказной работы и появления отказа, как противоположных событий, равна единице:

$$P(t_{cp}) + Q(t_{cp}) = 1. \quad (6.5)$$

3. Плотность распределения отказов:

а) вероятностное определение

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = -\frac{d}{dt} P(t), \quad (6.6)$$

т.е.  $f(t)$  – плотность вероятности того, что время работы РЭС до отказа окажется меньше  $t$ .

б) статическое определение

$$\hat{f}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - N(t)}{N(0)\Delta t} = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(0)\Delta t} = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(0)\Delta t}, \quad (6.7)$$

где  $\hat{f}(t)$  – отношение числа отказов в интервале времени  $(t, t + \Delta t)$  к произведению количества исправных РЭС в начальный момент времени  $t = 0$  на длительность промежутка времени  $\Delta t$ .

4. Интенсивность отказов РЭС в момент времени  $t$ :

а) вероятностное определение

$$\lambda(t) = \frac{1}{1 - F(t)} \frac{d}{dt} F(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (6.8)$$

где  $\lambda(t)$  – условная плотность вероятности отказа РЭС к моменту времени  $t$  при условии, что до этого момента отказ РЭС не произошел;

б) статистическое определение

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}, \quad (6.9)$$

где  $\hat{\lambda}(t)$  – отношение числа отказов за промежуток времени  $(t, t + \Delta t)$  к произведению количества исправных РЭС в момент времени  $t = 0$  на длительность промежутка времени  $\Delta t$ .

5. Средняя наработка РЭС до отказа:

а) вероятностное определение

$$\hat{T}_{cp} = M\{T_1\} = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (6.10)$$

В выражении (6.10) величина  $\hat{T}_{cp}$  является математическим ожиданием (средним значением) наработки до отказа;

б) статистическое определение

$$\hat{T}_{cp} = \frac{1}{N(0)}(T_1^{(1)} + T_1^{(2)} + \dots + T_1^{[N(0)]}) = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} T_1^i. \quad (6.11)$$

Значение  $T_{cp}$  чаще записывается в форме

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (6.12)$$

где  $t_i = T_i$  – случайное время наработки до  $i$ -того отказа;  $N = N(0)$  – количество РЭС, поставленных на испытание в момент времени  $t = 0$ .

Из рассмотренных количественных показателей надежности для восстанавливаемых РЭС наиболее важным является интенсивность отказов  $\lambda(t)$ . Многочисленными исследованиями установлены три основные зависимости интенсивности отказов от наработки технических устройств (рис. 6.1). Для устройств первой группы с функцией интенсивности  $\lambda(t)$  (см. рис. 6.1, а) характерны относительно короткий период I приработки, на котором  $\lambda(t)$  либо убывает, либо нарастает (пунктирные линии), и основной период II нормальной эксплуатации РЭС, в течение которого интенсивность отказов не зависит от наработки и остается постоянной вплоть до выработки назначенного ресурса.

Для устройств второй группы (см. рис. 6.1, б) типично закономерное ухудшение их параметров по наработке и практически линейное возрастание интенсивности отказов.



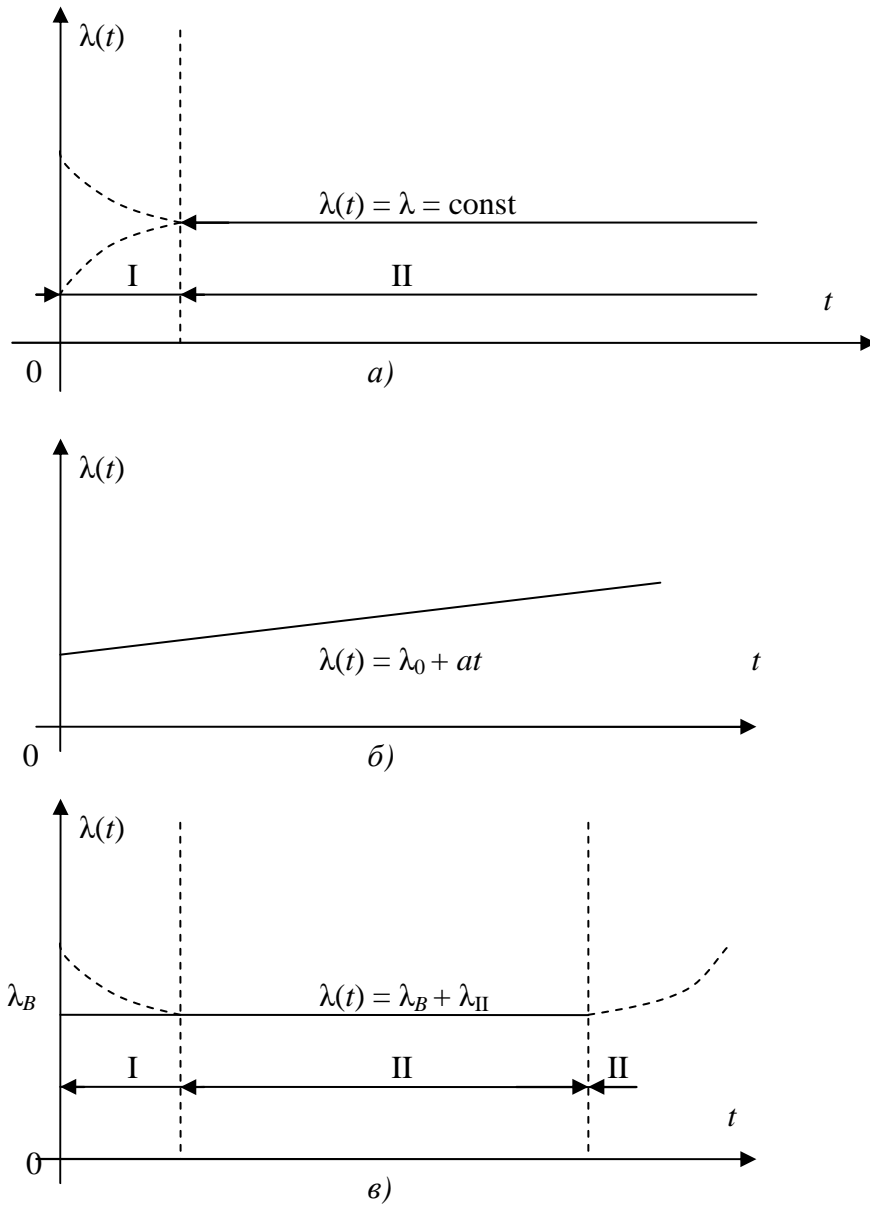


Рис. 6.1. Зависимость интенсивности отказов от наработки

На кривой интенсивности  $\lambda(t)$  третьего вида (см. рис. 6.1, в) можно выделить три участка – период приработки I, период нормальной эксплуатации II с  $\lambda(t) = \text{const}$  и период III с возрастанием интенсивности отказов по причине износа и старения РЭС. Для РЭС с  $\lambda(t)$  видов б) и в) предусматривается проведение профилактических работ и ремонтов с целью поддержания высокого уровня их надежности в течение всего срока службы (ресурса). Межремонтный ресурс для устройств с интенсивностью отказов вида в) обычно назначается до наступления процессов износа и старения.

Для стационарных потоков отказов, когда  $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ , приведенные выше соотношения (6.1) – (6.12) упрощаются.

Они принимают вид

$$P(t_{cp}) = e^{-\lambda(t)}; \quad (6.14)$$

$$q(t_{cp}) = 1 - e^{-\lambda(t)}; \quad (6.15)$$

$$f(t_{cp}) = \lambda e^{-\lambda(t)}; \quad (6.16)$$

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}. \quad (6.17)$$

Для анализа постепенных отказов с учетом явлений износа и старения используется гипотеза о нормальном распределении наработки до отказа. Тогда плотность вероятности постепенных отказов выражается как

$$f_{II}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_{II})^2}{2\sigma^2}}, \quad (6.18)$$

а

$$P_{II}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-T_{II})^2}{2\sigma^2}} dt = 0,5 - \Phi\left(\frac{t-T_{II}}{\sigma}\right), \quad (6.19)$$

где  $T_{II}$  и  $\sigma$  – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение наработки до постепенного отказа;  $\Phi\left(\frac{t-T_{II}}{\sigma}\right)$  – нормированная функция Лапласа.

Соответственно интенсивность постепенных отказов

$$\lambda_{II}(t) = \frac{f_{II}(t)}{P_{II}(t)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{e^{-\frac{(t-T_{II})^2}{2\sigma^2}}}{0,5 - \Phi\left(\frac{t-T_{II}}{\sigma}\right)}. \quad (6.20)$$

Выражения (6.18) – (6.20) используются в данном случае для описания и расчета характеристик надежности РЭС с кривой интенсивности  $\lambda(t) = \lambda_R + \lambda_{II}(t)$ , где  $\lambda_R$  – постоянная по наработке интенсивность внезапных отказов, а  $\lambda_{II}(t)$  – интенсивность постепенных отказов.

С учетом (6.20) будем иметь:

$$P(t) = e^{\int_0^t [\lambda_B + \lambda_{II}(t)] dt} = e^{-\lambda_B t [0,5 - \Phi\left(\frac{t-T_{II}}{\sigma}\right)]}; \quad (6.21)$$

$$f(t) = [\lambda_B + \lambda_{II}(t)] e^{-\lambda_B t [0,5 - \Phi\left(\frac{t-T_{II}}{\sigma}\right)]}. \quad (7.22)$$

На рис. 6.2 показан вид зависимостей вероятности безотказной работы от наработки для устройств, имеющих интенсивности отказов, приведенные на рис. 6.1.

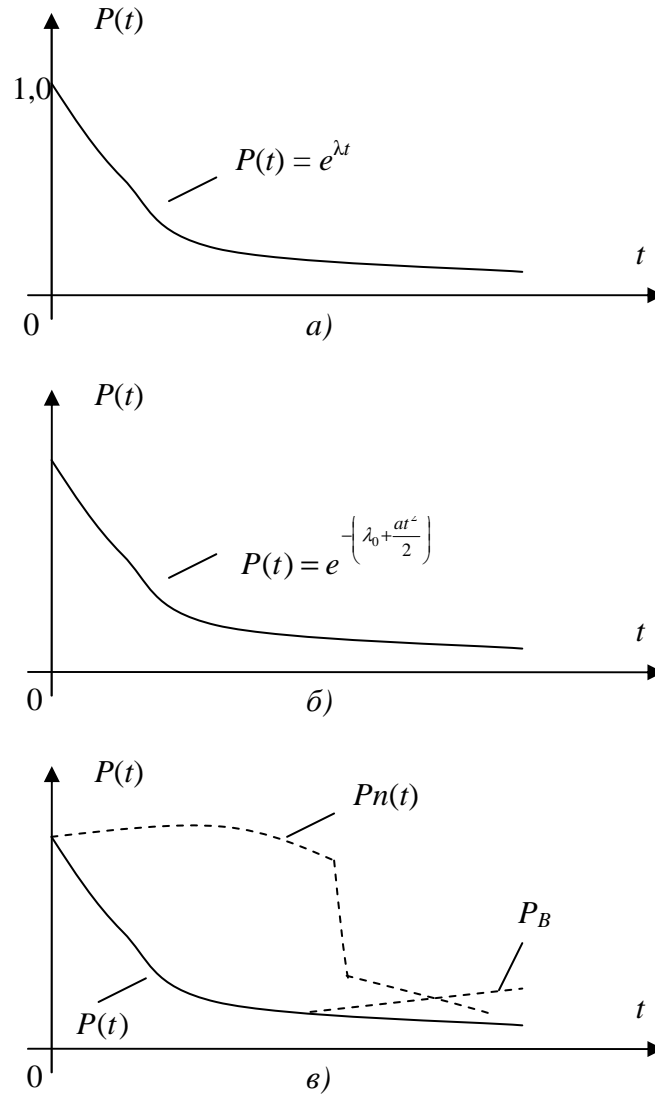


Рис. 6.2. Зависимости вероятности безотказной работы от наработки

До сих пор речь шла о вероятностных показателях надежности РЭС. По статистическим данным, полученным в процессе эксплуатации или испытания РЭС, можно вычислить

$$P(t) = R(t) / R_0; \quad (6.23)$$

$$q(t) = n(t) / R_0 = 1 - p(t), \quad (6.24)$$

где  $R_0$  – число поставленных на испытание РЭС;  $R(t)$  – число работоспособных РЭС;  $n(t)$  – число отказавших РЭС за время наработки  $t$ ;  $R_0 = R(t) + n(t)$ .

Вопросы оценки показателей надежности РЭС по статистическим данным будут рассмотрены ниже.

## 6.5. Восстанавливаемые РЭС

Для восстанавливаемых объектов приведем только дополнительные показатели надежности.

Все показатели надежности для невосстанавливаемых РЭС, в случае необходимости, могут быть применены для оценки безотказности и восстанавливаемых РЭС.

Испытания на надежность восстанавливаемых РЭС могут быть рассмотрены в следующей последовательности.

В начальный момент времени изделие РЭС поступает на испытание и работает до отказа.

При отказе происходит полное восстановление изделия, и оно вновь работает до отказа, и т.д. Как правило, РЭС восстанавливаются агрегатным методом, т.е. заменой отказавшего изделия на исправное (или заменой отдельных деталей или сборочных единиц).

События отказов восстанавливаемых однотипных РЭС образуют поток однородных событий. В свою очередь, события восстановления (замены) РЭС также образуют поток однородных событий восстановления.

При рассмотрении надежности восстанавливаемых изделий РЭС в смысле их безотказности время восстановления не учитывается, поэтому можно считать события отказа и восстановления совпадающими.

В качестве характеристик потока отказов восстанавливаемых радиоустройств обычно используются:

– ведущая функция потока, равная математическому ожиданию числа отказов восстанавливаемых РЭС в интервале наработки:

$$\bar{n}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n(t),$$

где  $P_n(t)$  – вероятность появления равно  $n$  отказов в интервале  $t$ ;

– интенсивность потока отказов

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\bar{n}(\Delta t + t) - \bar{n}(t)}{\Delta t} = \frac{d\bar{n}(t)}{dt}, \quad (6.25)$$

где  $\bar{n}(\Delta t + t)$ ,  $\bar{n}(t)$  – соответственно математические ожидания чисел отказов в интервалах  $(t + \Delta t)$  и  $(0, t)$ ;

– параметр потока отказов, представляющий собой плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого изделия РЭС в рассматриваемый момент времени,

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - P_0(t, t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad (6.26)$$

где  $P_0(t, t + \Delta t)$  – вероятность того, что в интервале  $(t, t + \Delta t)$  отказов не будет.

Наработка на отказ, равная отношению наработки  $t_{\Sigma}$  восстанавливаемых изделий РЭС к математическому ожиданию числа их отказов в течение этой наработки  $\bar{n}(t + t_{\Sigma})$ :

$$T_0(t, t_{\Sigma}) = \frac{t_{\Sigma}}{n(t + t_{\Sigma})}. \quad (6.27)$$

Отличие параметра  $\mu(t)$  от интенсивности  $\omega(t)$  потока отказов состоит в следующем: если рассматривать малый интервал наработки  $(t, t + dt)$ , то  $\mu(t)dt$  примерно равно вероятности появления ровно одного отказа в этом интервале,  $\omega(t)dt$  – вероятность появления хотя бы одного отказа.

При испытаниях полагают, что отказы восстанавливаемых РЭС образуют ординарные пуассоновские потоки, для которых  $\mu(t) = \omega(t)$  и справедливы соотношения

$$P_n(t_1, t_2) = \frac{\left[ \int_{t_1}^{t_2} \omega(u) du \right]^n}{n!} e^{-\int_{t_1}^{t_2} \omega(u) du}; \quad (6.28)$$

$$\bar{n}(t + t_{\Sigma}) = \int_{t_1}^{t+t_{\Sigma}} \omega(u) du; \quad (7.29)$$

$$T_0 = (t, t + t_{\Sigma}) = \frac{t_{\Sigma}}{\int \omega(u) du}. \quad (6.30)$$

Следует заметить, что при постоянной интенсивности отказов ( $\lambda = \text{const}$ ) наработка на отказ равна наработке до отказа РЭС, т.е.

$$T_0 = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{\lambda} = T_{cp}. \quad (6.31)$$

Выше были приведены единичные показатели надежности. Примером комплексного показателя надежности может служить коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0}{T_0 + T_B}, \quad (6.32)$$

где  $T_0$  – наработка на отказ;  $T_B$  – среднее время восстановления.

Из формулы (6.32) следует, что коэффициент готовности характеризует одновременно два свойства надежности – безотказность и ремонтно-пригодность.

## 6.6. Специальные показатели надежности РЭС

С появлением РЭС, имеющих в своем составе цифровые вычислительные устройства, в практических расчетах надежности стали применяться специальные показатели, основными из которых являются:

- вероятность  $A(a, t)$  заданной суммарной наработки  $a$  за фиксированное календарное время  $t$ ;
- вероятность  $B(b, t)$  наличия интервала безотказной работы, большего заданной величины  $b$ , за фиксированное календарное время  $t$ ;
- вероятность  $C^*(c, t)$  отсутствия интервала простоя, большего допустимой величины  $c$ , за фиксированное суммарное время простоя  $t$ .

Рассмотрим более подробно содержание перечисленных специальных показателей надежности РЭС.

1. Вероятность заданной суммарной наработки  $a$  за фиксированное календарное время  $t$ :

а) вероятностное определение

$$A(a, t) = P\{S(t) \geq a\}, \quad (6.33)$$

где  $a$  – заданный уровень суммарной наработки;  $S(t)$  – суммарная наработка за время  $t$ .

б) статистическое определение

$$\hat{A}(a, t) = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} [S_i(t)]_a, \quad (6.34)$$

где  $N(0)$  – общее число устройств;  $S_i(t)$  – суммарная наработка  $i$ -того устройства за время  $t$ ;

$$[S_i(t)]_a = \begin{cases} 1, & \text{если } S_i(t) \geq a \\ 0, & \text{если } S_i(t) < a \end{cases}.$$

Показатели  $A(a, t)$  и  $\hat{A}(a, t)$  используются при оценке надежности систем, которые имеют перерывы в работе и могут включаться в любой момент времени  $t$ .

2. Вероятность наличия интервала безотказной работы, большего заданной величины  $b$ , за фиксированное календарное время  $t$ :

а) вероятностное определение

$$B(b, t) = P\{\exists T_i \geq b, T_i \in [0, t]\}, \quad (6.35)$$

где  $b$  – заданная величина интервала;  $t$  – фиксированное календарное время;  $\exists$  – квантор «существует»;  $T_i$  – интервал безотказной работы;  $B(b, t)$  – вероятность того, что за время  $t$  проявится хотя бы один интервал безотказной работы  $T_i$ , больший заданной величины  $b$ .

б) статистическое определение

$$\hat{B}(t_0, t) = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} [\{T, h\}_i]_b, \quad (6.36)$$

где  $\{T, h\}_i$  – реализация последовательности интервалов безотказной работы и простоя для  $i$ -того устройства за время  $t$ ;  $[\{T, h\}_i]_b = 1$ , если за время  $t$  в  $\{T, h\}_i$  существует хотя бы один интервал  $T_i$ , больший  $b$ , в противном случае  $[\{T, h\}_i]_b = 0$ .

Показатели (6.33) – (6.36) используются для оценки надежности РЭС, в которых после сбоя или отказа возможно повторное выполнение прежней программы.

2. Вероятность отсутствия интервала простоя, большего допустимой величины  $c$ , за фиксированное суммарное время простоя  $t$ :

а) вероятностное определение

$$C^*(c, t) = P\{\forall h_i < c \mid S_B(t) = t, h_i \in [0, t]\}, \quad (6.37)$$

где  $h_i$  – интервал простоя (включая часть незавершенного последнего интервала  $h^*$ );  $S_B(t)$  – суммарное время простоя;  $C^*(c, t)$  – вероятность того, что за суммарное время простоя не появится ни одного интервала простоя  $h_i$  (включая часть незавершенного последнего интервала  $h^*$ ), большего заданной величины  $C$  ( $\forall$  – квантор «для всех»).

б) статистическое определение

$$\hat{C}^*(c, t) = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} [\{h_i\}]_c, \quad (6.38)$$

где  $\{h\}$  – реализация последовательности интервалов безотказного простоя для  $i$ -того изделия РЭС за суммарное время простоя  $t$ .

Запись  $[\{h_i\}]_c$  в выражении (6.38) означает:  $[\{h_i\}]_c = 1$ , если за время  $t$  в  $\{h_i\}$  не существует ни одного интервала простоя  $\xi_i$  (включая часть незавершенного интервала), большего  $C$ , в противном случае  $[\{h_i\}]_c = 0$ .

Проще говоря,  $C^*(c, t)$  – это доля общего числа РЭС, у которых в реализации времени простоя за суммарное время простоя  $t$  не окажется ни одного интервала простоя  $\xi$  (включая часть незавершенного простоя интервала  $h^*$ ), большего заданной величины.

## 6.7. Оценка надежности РЭС вероятностными методами

Оценка показателей надежности (безотказности) вероятностными методами производится как на этапе проектирования, так и в процессах испытаний и эксплуатации РЭС. При оценке надежности сложных невосстанавливаемых РЭС предполагается, что интенсивности отказов составляющих ее элементов известны, а сама РЭС разделяется на такие элементы, отказы которых можно считать независимыми.

Соединение элементов системы называется последовательным (в смысле надежности), если отказ хотя бы одного из них приводит к отказу всей системы. Вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением  $m$  элементов равна

$$P_c(t) = \prod_{k=1}^m P_k(t) = e^{-\int_0^t \sum_{k=1}^m \lambda_k(u) du}, \quad (6.39)$$

где  $P_k$ ,  $\lambda_k(u)$  относится к  $k$ -тому элементу РЭС, а вероятность отказа системы

$$q_c(t) = 1 - P_c(t). \quad (6.40)$$

Интенсивность отказов РЭС с последовательным соединением элементов определяется суммой

$$\lambda_c(t) = \sum_{k=1}^m \lambda_k. \quad (6.41)$$

Средняя наработка до отказа РЭС

$$T_{1c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda_c(u) du} dt. \quad (6.42)$$

По (6.39) – (6.42) можно оценить показатели РЭС при любых функциях интенсивности отказов. В частности, при  $\lambda_k = \text{const}$ ;  $k = 1, 2, 3, \dots, m$

$$\lambda_c(t) = \sum_{k=1}^m \lambda_k; \quad (6.43)$$

$$T_1 = \frac{1}{\lambda_c}; \quad (6.44)$$

$$P_c = e^{-\lambda_c t}. \quad (6.45)$$

Последовательное соединение элементов на структурной схеме надежности (рис. 6.3) называется также основным. Из анализа (6.39) – (6.42) следует, что чем больше элементов последовательно соединено в РЭС, тем ниже ее показатели надежности.



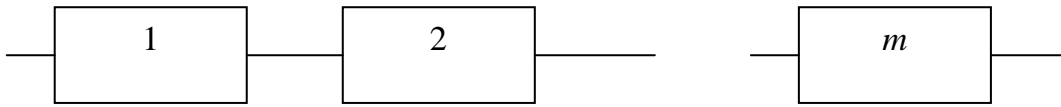


Рис. 6.3. Последовательное соединение элементов

Если, например, надежность РЭС должна быть равна  $P_c(t) = 0,9$ , а она состоит из 10 элементов, то надежность (в смысле вероятности безотказной работы) каждого элемента должна быть не менее 0,99. Однако если в РЭС 1000 элементов, надежность каждого из них уже должна иметь величину 0,9999.

При параллельном соединении элементов (рис. 6.4) отказ РЭС происходит только тогда, когда отказывают все элементы. Вероятность отказа РЭС при параллельном соединении элементов равна произведению вероятностей отказов отдельных элементов:

$$q_c(t) = \prod_{k=1}^m q_k(t) = \prod_{k=1}^m [1 - P_k(t)]. \quad (6.46)$$

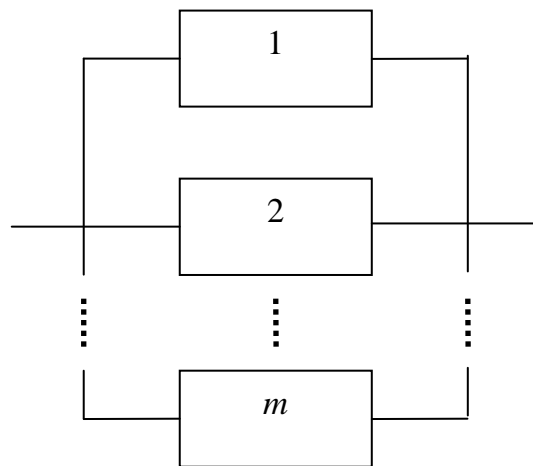


Рис. 6.4. Параллельное соединение элементов

Из анализа (6.46) следует, что с увеличением числа параллельно соединенных элементов вероятность безотказной работы системы повышается. Поэтому системы с параллельным соединением сборочных единиц, блоков и т.д. называются *резервированными*, а величина  $m - 1$  считается *кратностью резервирования*.

Обычно параллельно соединенные элементы являются одинаковыми по конструкции. Если принять  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_m = \lambda = \text{const}$ , то с учетом (6.14) – (6.16) формулу (6.46) можно преобразовать к виду

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^m = \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} C_m^k e^{-k\lambda t}. \quad (6.47)$$

Функция плотности вероятности наработки до отказа

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda(t)P(t). \quad (6.48)$$

По аналогии с (6.48) продифференцируем (6.47) и получим

$$f_c(t) = \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} C_m^k k \lambda e^{-k\lambda t} = m \lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{m-1}. \quad (6.49)$$

Отсюда интенсивность отказов системы

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)} = \frac{m \lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^{m-1}}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^m}. \quad (6.50)$$

Средняя наработка до отказа системы в этом случае будет равна

$$T_{1c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} C_m^k e^{-k\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \left[ 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{m} \right], \quad (6.51)$$

т.е. величина  $T_{1c}$  возрастает с увеличением кратности резервирования  $m - 1$ .

На рис. 6.5, 6.6 показаны структурные схемы надежности с различными видами резервирования. При расчете схем с общим резервированием (см. рис. 6.5, а) вначале используется формула для последовательного соединения элементов, а затем – параллельного. Для структурных схем, приведенных на рис. 6.5, б, наоборот, вначале подсчитывается вероятность безотказной работы для участков с параллельным соединением элементов, а затем – для последовательного соединения участков.

Для схемы на рис. 6.5, б будем иметь

$$P_{cp}(t) = \prod_{i=1}^r \left[ 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_{ij}(t)) \right]. \quad (6.52)$$

Более сложным является смешанное резервирование (см. рис. 6.6, а). Для оценки надежности такой системы используется каноническое уравнение

$$\prod_{k=1}^m (P_K + q_K) = 1. \quad (6.53)$$

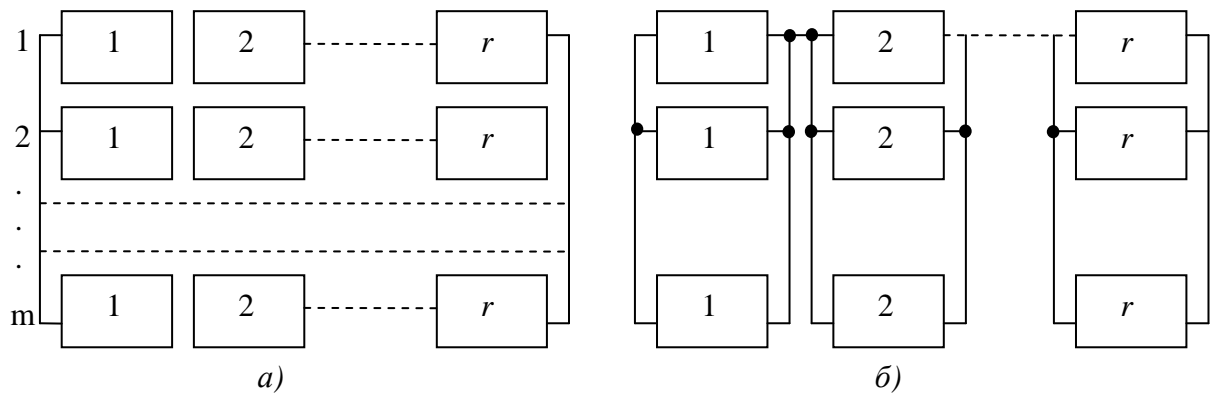


Рис. 6.5. Структурные схемы надежности:  
 а) с общим резервированием; б) с отдельным резервированием

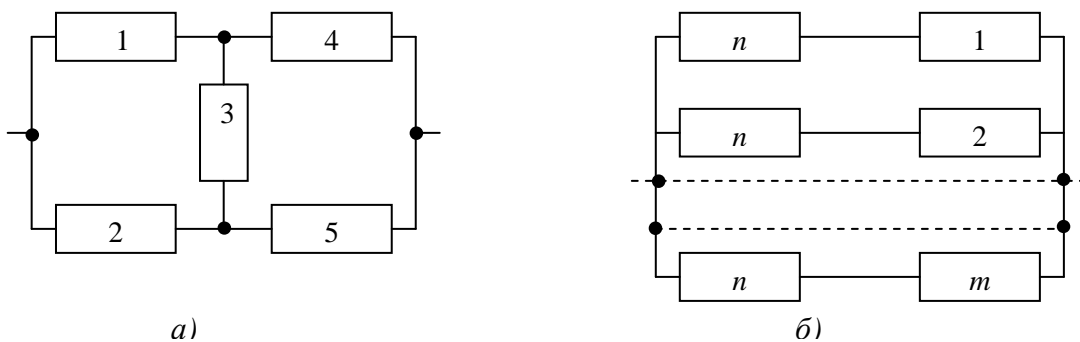


Рис. 6.6. Структурные схемы надежности:  
 а) со смешанным резервированием; б) с резервированием замещением

Равенство (6.53) охватывает все  $2^m$  возможных состояний системы из  $m$  элементов, образующих полную группу состояний. Например, полагая, что в схеме на рис. 6.6, а все элементы равнонадежны ( $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_5 = \lambda$ ), получим

$$(p + q)^5 = p^5 + 5p^4q + 10p^3p^2 + 10p^2q^2 + 5pq^4 + q_5 = 1.$$

Будем считать, что система работоспособна, если сохраняется хотя бы одна цепь из исправных элементов, связывающих вход и выход системы.

Отказ системы произойдет, если откажут все элементы. Вероятность такого события равна  $q^5$ . Отказ любых четырех элементов с вероятностью  $5pq^4$ , а также отказы трех элементов в комбинациях 123, 124, 125, 451, 452, 453, 135, 234 (вероятность  $8p^2q^3$ ) и двух в комбинациях 12, 45 (вероятность  $2p^3q^2$ ) приводят к нарушению работоспособности системы. Таким образом, вероятность отказа системы можно оценить с помощью уравнения

$$q_c = q^5 + 5pq^4 + 8p^2q^3 + 2p^3q^2,$$

а вероятность безотказной работы

$$p_c = p^5 + 5p^4q + 8pq^2 + 2p^2q^3.$$

На практике находит применение приближенный способ оценки надежности РЭС по среднегрупповым интенсивностям отказов элементов. По этому способу подсчитывается количество  $m_i$  однотипных элементов, имеющих в системе (однотипных транзисторов, конденсаторов, диодов, резисторов и т.д.). По справочникам определяется значение  $\lambda_i$  интенсивности отказов элементов, а интенсивность отказов системы оценивается путем сложения суммарных интенсивностей отказов всех групп однотипных элементов, входящих в систему:

$$\lambda_c = \sum_{j=1}^K m_j \lambda_j, \quad (6.54)$$

где  $K$  – число групп однотипных элементов.

В оценке показателей надежности РЭС принимаются во внимание режимы их работы и воздействие на них различных физических факторов (температуры, вибрации, давления). На рис. 6.7 приведены для примера такие зависимости для транзисторов, диодов и трансформаторов, где  $\lambda_0$  – интенсивность отказов элементов по справочным данным.

В общем случае табличные значения интенсивности отказов, полученные для нормальных условий (15 °С, 760 мм рт. ст.), принято умножать на эксплуатационный коэффициент  $\alpha > 1$  и считать  $\lambda = \alpha \lambda_0$ . Значения коэффициентов устанавливаются с учетом опыта эксплуатации или путем специально поставленных испытаний.

Отметим некоторые особенности оценки надежности электрических схем РЭС, где возможны отказы элементов двух типов – обрыв цепи или короткое замыкание. Каноническое уравнение надежности для электрической схемы, состоящей из  $m$  элементов, имеет вид

$$\prod_{k=1}^m (P_k + q_{k(\kappa\text{з})} + q_{k(0)}) = 1, \quad (6.55)$$

где  $P_k$  – вероятность безотказной работы  $k$ -того элемента;  $q_{k(\kappa\text{з})}$ ,  $q_{k(0)}$  – вероятности короткого замыкания и обрыва  $k$ -того элемента.

Методику оценки надежности системы с учетом возможных обрывов и коротких замыканий рассмотрим на примере простой схемы, приведенной на рис 6.8, для которой можно записать равенство

$$(p + q_{\kappa\text{з}} + q_0)^4 = 1.$$

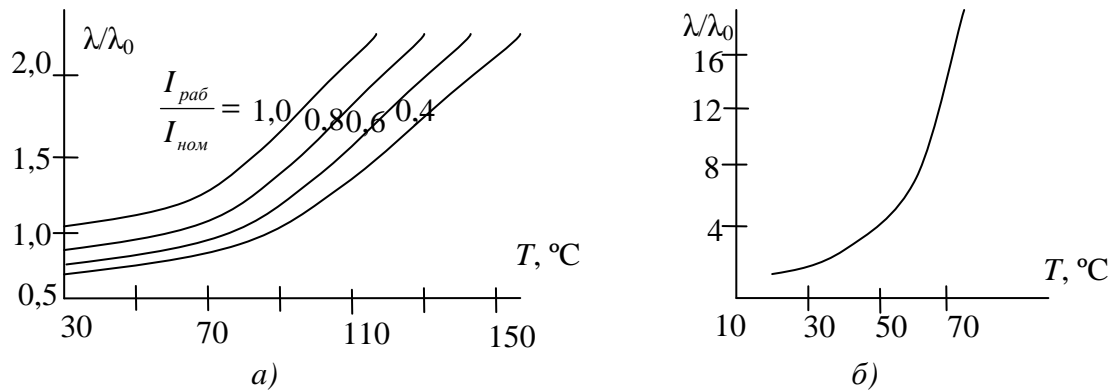


Рис. 6.7. Зависимость интенсивности отказов от температуры:  
 а) диодов и транзисторов; б) трансформаторов

Число возможных состояний по приведенной формуле равно  $3^4 = 81$ , из них одно с вероятностью  $p^4$  соответствует работоспособному состоянию всех четырех элементов, а остальные – различным комбинациям обрывов и коротких замыканий элементов. Анализ схемы на рис. 6.8 показывает, что в 39 случаях из 81 система сохраняет работоспособность, а вероятность безотказной работы определяется суммой

$$P_c = p^4 + 4p^3q_{обр} + 4p^3q_{кз} + 12p^2q_{обр}q_{кз} + 4p^2q_{кз}^2 + 2p^2q_{обр}^2 + 8pq_{обр}q_{кз}^2 + 4pq_{обр}^2q_{кз}.$$

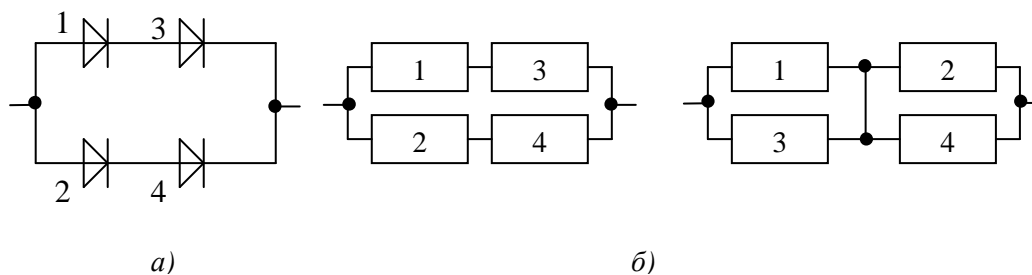


Рис. 6.8. Структурные схемы надежности: а) по обрыву; б) по короткому замыканию

Здесь, например величине  $4p^2q_{кз}^2$  отвечают короткие замыкания элементов комбинациях 12, 34, 14, 32 при двух других исправных элементах. Заметим, что структурные схемы надежности, показанные на рис. 6.8, отдельно по обрыву и по короткому замыканию различны.

## 6.8. Способы повышения надежности РЭС

Можно сформулировать следующие пути обеспечения высокой надежности РЭС:

- применение современных изделий электронной техники с таким сочетанием их характеристик, которое обеспечивает стабильную и безотказную работу РЭС;
- использование в ряде случаев облегченных режимов работы комплектующих изделий (например, перевод на 50 %-ную нагрузку диодов, транзисторов, конденсаторов и других комплектующих изделий электронной техники уменьшает интенсивность их отказов в 2 – 5 раз), наличие значительных запасов прочности в деталях и сборочных единицах;
- резервирование наиболее ответственных блоков и устройств РЭС;
- применение специальных схем и средств защиты РЭС от перегрузочных режимов.

Одним из эффективных способов повышения надежности выпускаемых комплектующих изделий электронной техники являются *технологические тренировки*. Технологической тренировкой называется испытание готовых изделий под повышенной нагрузкой с целью отбраковки из их числа потенциально ненадежных. Величину нагрузки выбирают такой, чтобы в процессе тренировки вызвать отказ у потенциально ненадежных изделий, не повреждая при этом годных. Отказавшие изделия изымаются, а выдержавшие испытания признаются годными к эксплуатации.

Технологические тренировки стараются проводить в период приработки (см. рис. 6.1) изделий. При тренировке изделий большое значение имеет выбор вида нагрузки. Например, для полупроводниковых приборов и интегральных схем наибольший интерес при отбраковке потенциально ненадежных изделий представляют электрическая и термическая нагрузки.

Исследования показывают [11], что тренировки под электрической нагрузкой для полупроводниковых приборов более предпочтительны, чем их испытания под термической нагрузкой – работа полупроводниковых приборов и микросхем под электрической нагрузкой позволяет выявлять отказы, которые обычно нельзя обнаружить при термических нагрузках. Известны, например, причины отказов вследствие рассеяния мощности внутри прибора и возникновения градиента температуры между р-п переходом и корпусом прибора. При испытаниях под электрической нагрузкой возникают электрические поля, которые ускоряют миграцию ионов различных загрязнений к р-п переходу.

Иногда при тренировке микросхем и полупроводниковых приборов целесообразно применять комбинацию электрической и термической на-

грузок, так как при приложенном напряжении могут возникать инверсные каналы, а повышенная температура будет ускорять отказ, в этом случае – за счет увеличения скорости носителей.

*Резервирование* представляет собой способ повышения надежности РЭС введением избыточности. Структурное резервирование предусматривает использование дополнительных, избыточных элементов структуры объекта, таких же по конструкции, как основные элементы. Эти избыточные элементы обеспечивают работоспособность РЭС в случае отказа основных элементов. По способу включения выделяют *резервирование постоянное*, при котором резервированные элементы участвуют в функционировании РЭС наравне с остальными, и *резервирование замещением*, при котором функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного элемента.

По схеме включения различают *общее резервирование*, когда резервируются РЭС в целом, и *раздельное резервирование*, при котором резервируются отдельные элементы или их группы. Резервирование может быть также смешанным. По режиму работы резерв может быть нагруженным, т.е. работающим в том же режиме, что и основной элемент, ненагруженным, т.е. не включенным под нагрузку, и облегченным, когда резервный элемент находится в менее нагруженном режиме, чем основной.

Рассмотрим показатели надежности РЭС с резервированием. Выше были приведены формулы вероятности безотказной работы для РЭС с постоянно нагруженным общим (см. рис. 6.5, а) и раздельным резервированием (см. рис. 6.5, б). Оценим эффективность раздельного резервирования из отношения вероятностей отказа нерезервированной системы (основного соединения), когда  $q_c = 1 - P_0(t)$ , и резервированной с интенсивностью отказа  $q_{cp} = 1 - P_{cp}(t)$ :

$$\mu_{разд} = \frac{1 - P_0(t)}{1 - P_{cp}(t)} = \frac{1 - p^2(t)}{1 - \left\{1 - [1 - p(t)]^m\right\}^2}, \quad (6.56)$$

где  $P(t) = P_{ij}(t)$ , см. (6.52);  $P_{cp}(t)$  – вероятность безотказной работы системы с раздельным резервированием.

Эффективность общего резервирования

$$\mu_{общ} = \frac{1 - P_0(t)}{1 - P_{co}(t)} = \frac{1 - p^2(t)}{[1 - p^2(t)]^m} = \frac{1}{[1 - p^2(t)]^{m-1}}, \quad (6.57)$$

где  $P_{co}(t) = 1 - \prod_{j=1}^m \left[1 - \prod_{i=1}^r P_{ij}(t)\right]$  – вероятность безотказной работы системы при общем резервировании. По аналогии с (6.57) здесь также  $P(t) = P_{ij}(t)$ .

Оба способа резервирования дают существенное увеличение вероятности безотказной работы. Для их сопоставления возьмем отношение

$$h = \frac{\mu_{разд}}{\mu_{общ}} = \frac{[1 - p^2(t)]^m}{1 - \{1 - [1 - p(t)]^m\}^2}. \quad (6.58)$$

Так как  $p = 1 - q$ , то

$$h = \frac{\{1 - [1 - q(t)]^2\}^m}{1 - [1 - q^m(t)]^2}. \quad (6.59)$$

При  $q < 0,1$  (что на практике часто имеет место)  $(1 - q)^a \approx 1 - aq$ . Тогда  $h \approx r^{m-1}$ .

Таким образом, при равном количестве элементов эффективность отдельного резервирования в  $r^{m-1}$  раз больше, чем общего резервирования. Если требуется обеспечить заданную надежность резервированной системы  $P_{с.зад}$ , то при отдельном резервировании она достигается при меньшем количестве резервных элементов.

### 6.9. Надежность системы с резервированием замещением

При резервировании замещением отключение отказавшего элемента и подключение резервного осуществляется с помощью переключателей П (см. рис. 6.6, б).

При нагруженном резерве общая надежность системы с резервированием замещением из-за отказов переключателей будет ниже, чем при постоянно включенном резерве. Поэтому способ резервирования замещением целесообразен только при ненагруженном или облегченном резервах.

Рассмотрим случай ненагруженного резерва, полагая, что до момента включения он исправен с вероятностью единица. Основным элементом, проработав случайное время  $t_1$ , отказывает и заменяется первым резервным элементом, работающим случайное время  $t_2$ , и т.д. Проработав время  $t_m$ , отказывает последний  $m$ -ый элемент, а с ним и вся резервированная система с общим временем наработки

$$t = \sum_{i=1}^m t_i. \quad (6.60)$$

Случайные величины  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) являются независимыми, и поэтому распределение случайной величины  $t$  представляет собой распределение суммы  $m$  независимых случайных величин.



В частности, при  $m = 2$   $t = t_1 + t_2$  и функция плотности распределения вероятностей находится по соотношению

$$f_2(t) = \int_0^t f_0(t_1) f_p(t - t_1) dt_1, \quad (6.61)$$

где  $f_0(t)$ ,  $f_D(t)$  – функции плотности вероятности случайной наработки до отказа соответственно основного и резервного элементов со своими переключателями.

Будем полагать, что распределение наработки до отказа элементов с переключателями – экспоненциальное с одинаковыми интенсивностями  $\lambda^*$ .

Тогда

$$f_2(t) = \int_0^t \lambda^* e^{-\lambda^* t_1} \lambda^* e^{-\lambda^* (t-t_1)} dt_1 = (\lambda^* t) \lambda^* e^{-\lambda^* t}. \quad (6.62)$$

Последовательно применяя (6.62) для  $m = 3$ , затем  $m = 4$  и т.д., для кратности резервирования  $(m - 1)$  получим

$$f_m(t) = (\lambda^* t)^{m-1} \lambda^* e^{-\lambda^* t}. \quad (6.63)$$

Проинтегрируем (6.63) по  $dt$  и найдем вероятность отказа резервированной системы

$$q_m(t) = 1 - e^{-\lambda^* t} \sum_{i=1}^{m-1} \frac{(\lambda^* t)^i}{i!}. \quad (6.64)$$

Например, при дублировании, когда  $m = 2$ ,

$$q_2(t) = 1 - (1 + \lambda^* t) e^{-\lambda^* t}. \quad (6.65)$$

Средняя наработка до отказа системы находится усреднением (6.60):

$$T_c = M(t) = \sum_{i=1}^m M(t_i) = mT = \frac{m}{\lambda^*}. \quad (6.66)$$

Сравнивая среднюю наработку до отказа системы при резервировании замещением (6.66) и при постоянном резервировании (6.51) по их отношению, равному

$$\frac{T_c}{T_{1c}} = \frac{\lambda}{\lambda^*} = \frac{m}{\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{m}\right)}, \quad (6.67)$$

можно убедиться в том, что резервирование замещением при безотказных переключателях ( $\lambda^* = \lambda$ ) эффективнее постоянного при любых значениях интенсивности  $\lambda$  отказов основного и резервного элементов.

Например, при кратности резервирования  $m - 1 = 3$  отношение  $T_c/T_{1c} = 1,92$ .

С учетом надежности переключателей, приняв в системе с резервированием замещением  $\lambda^* = \lambda + \lambda_n$ , резервирование замещением будет эффективнее при соблюдении неравенства

$$\lambda_G < \lambda \left( \frac{m}{\left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{m}\right)} \right).$$

На рис. 6.9 показаны кривые вероятностей безотказной работы при двух видах резервирования (резервирование замещением и постоянное) и при отсутствии резервирования. Из сравнения этих кривых видно, что система 1 с резервированием замещением имеет бóльшую вероятность безотказной работы по сравнению с системами 2 и 3.

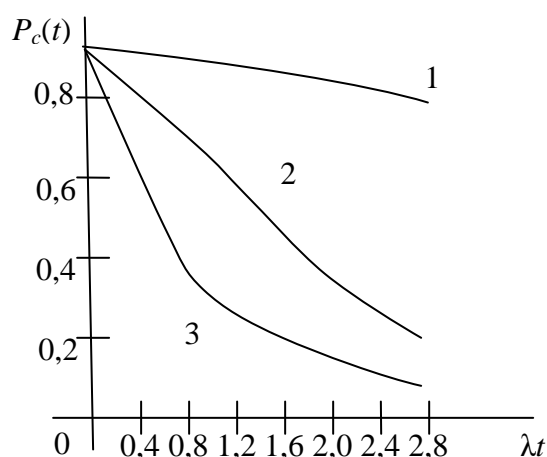


Рис. 6.9. Вероятность безотказной работы: 1 – резервирование замещением; 2 – постоянное резервирование; 3 – без резервирования

## 6.10. Методы определения точечных и интервальных оценок показателей надежности

### Точечные методы оценки показателей надежности

Методы точечных оценок надежности условно подразделяются на две группы:

- аналитические (методы моментов, квантилей, максимального правдоподобия и др);
- графические (построение гистограммы, интегральной функции безотказной работы РЭС и т.п.).

Достоверную оценку показателей надежности РЭС по результатам испытания можно получить лишь на основе анализа большого объема статистических данных. На практике всегда приходится иметь дело с ограниченными статистическими данными, которые по существу являются величинами случайными. Приближенное, случайное значение показателя надежности, получаемое в процессе испытания (эксперимента), принято называть оценкой этого показателя. Оценка должна выбираться с таким расчетом, чтобы даже при сравнительно небольшом объеме статистических данных ошибка от замены точного (вероятностного) значения показателя надежности его оценкой была по возможности малой.

Формальными признаками качества точечных оценок служат состоятельность, несмещенность и эффективность. Известно, что оценка  $\hat{a}$  называется состоятельной, если при увеличении числа опытов  $N$  она сходится по вероятности к показателю надежности  $a$ . В качестве примера можно указать на среднее время наработки до отказа, равное

$$T_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i. \quad (6.68)$$

Действительно, с увеличением числа испытаний  $N$  оценка  $\hat{T}_c$  сходится по вероятности к  $T_{cp}$ .

Оценка  $\hat{a}$  называется несмещенной, если она удовлетворяет условию отсутствия систематических ошибок, когда математическое ожидание  $M[\hat{a}]$  равно искомому показателю  $a$ , т.е.  $M[\hat{a}] = a$ .

Из равенства (6.68) следует, что оценка  $T_{cp}$  является также и несмещенной, т.к.

$$M[\hat{T}_c] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{T}_c = T_c. \quad (6.69)$$

Эффективной называется оценка  $\hat{a}$ , обладающая по сравнению с другими несмещенными оценками наименьшей дисперсией, т.е.

$$D[\hat{a}] = \min. \quad (6.70)$$

Параметр  $a$  характеризуется в процессе испытания одним числом, и поэтому оценка  $a$  называется *точечной*.

Метод моментов основан на том, что если число отказов достаточно велико, то в силу закона больших чисел значения статистических моментов близки к теоретическим. Идея метода моментов состоит в том, что моменты распределения, зависящие от результатов испытания, приравниваются к эмпирическим (опытным) моментам. Взяв число моментов равным числу оцениваемых параметров, получаем необходимое число уравнений.

Статистическим моментом  $k$ -того порядка называется величина

$$I_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^k, \quad (6.71)$$

где  $t_i$  – наработка  $i$ -того устройства до отказа;  $n$  – объем выборки.

Оценки параметров типовых распределений, полученные методом моментов, приведены в табл. 6.2.

Метод моментов достаточно прост в реализации, однако получаемые при этом оценки неэффективны и могут использоваться лишь при объемах выборки  $n \geq 30$ .

Таблица 6.2

**Оценка параметров типовых распределений**

Вид распределения	Оценка параметра	Принятые обозначения
Экспоненциальное	$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{T}}$	$\hat{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, K = 1$
Нормальное	$\hat{a} = \hat{T}$ $\hat{\sigma} = \sqrt{S^2}$	$S^2 = \frac{1}{n^2} \left[ n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n t_i \right)^2 \right],$ $K = 2$
Логарифмически нормальное	$\hat{\mu} = \hat{u}$ $\hat{\sigma} = \sqrt{v^2}$	$v^2 = \frac{1}{n(n-1)} \left[ n \sum_{i=1}^n (\ln t_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \ln t_i \right)^2 \right],$ $\hat{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i.$

В табл. 6.2 приняты обозначения:

$\hat{T}$  – первый выборочный момент;

$S^2$  – выборочная дисперсия;

$\hat{u}$  – выборочное среднее для логарифмических распределений;

$v^2$  – выборочная дисперсия для логарифмических распределений.

Метод квантилей основан на том, что квантили теоретического распределения приравниваются к статистическим квантилям. При этом используется столько статистических квантилей и, соответственно, уравнений, сколько параметров необходимо оценить.

Оценки параметров типовых распределений, полученные методом квантилей, имеют вид:

экспоненциальное

$$\hat{\lambda} = -\ln F_1/t_1; \quad (6.72)$$

нормальное

$$\hat{a} = \frac{\Phi^{-1}(F_1)t_2 - \Phi^{-1}(F_2)t_1}{\Phi^{-1}(F_1) - \Phi^{-1}(F_2)}; \quad (6.73)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{t_1 - a}{\ln \ln F_1^{-1}}, \quad (6.74)$$

где  $t_1, t_2$  – квантили статистической функции распределения;  $F_1, F_2$  – значения статистической функции распределения, соответствующие квантилям  $t_1$  и  $t_2$ ;  $\Phi^{-1}(F_1), \Phi^{-1}(F_2)$  – квантили функций стандартного нормального распределения, соответствующие уровням  $F_1$  и  $F_2$ .

Для использования метода квантилей требуется знание параметров статистической функции распределения. Кроме того, оценки, получаемые методом квантилей, обладают значительной дисперсией.

**Метод максимального правдоподобия** является универсальным и наиболее мощным с точки зрения эффективности оценок. Идея метода заключается в том, что для фиксированного результата испытания составляется функция отношения правдоподобия

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_n / R_1)}{f(x_1, x_2, \dots, x_n / R_0)}, \quad (6.75)$$

где  $f(x_1, x_2, \dots, x_n / R_1), f(x_1, x_2, \dots, x_n / R_0)$  – условные плотности распределения **выборки  $x_1, x_2, x_n$**  соответствующие уровням надежности  $R_1$  и  $R_0$ .

Уровень надежности считается приемлемым, когда

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq R_H. \quad (6.76)$$

В случае

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n) > R_H, \quad (6.77)$$

где  $R_H$  – некоторая нормативная величина надежности, партия устройств отклоняется, как не прошедшая испытания на надежность.

Аналогично при точечной оценке надежности

$$R(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq R_H, \quad (6.78)$$

партия устройств принимается, и бракуется, если

$$R(x_1, x_2, \dots, x_n) > R_H. \quad (6.79)$$

В качестве искомых точечных оценок в случаях (6.78) и (6.79) берутся значения параметров, максимизирующие функцию правдоподобия.

Графические методы определения точечных оценок надежности по результатам испытаний связаны с известными процедурами статистической обработки:

- построением вариационного ряда, гистограммы и функции интенсивности отказов;
- оценкой параметров статистической функции распределения и их точечных значений;
- оценкой согласия статистического распределения с выбранным теоретическим по количественному критерию.

### **Интервальные методы оценки показателей надежности**

Точечная оценка обладает существенным недостатком в том смысле, что она сама представляет собой лишь частное значение случайной величины. Поэтому, кроме точечной оценки, желательно найти такой интервал оценок, который с достаточно высокой вероятностью «накрывал» бы искомый показатель надежности.

Для определения точности оценок в математической статистике используются понятия доверительных интервалов и доверительных вероятностей, назначение которых можно объяснить следующим образом.

Потребуем, чтобы с достаточно высокой вероятностью  $\beta$  (например, 0,9; 0,95) отклонение оценки  $\hat{a}$  от ее точного (но неизвестного) значения  $a$  не превосходило некоторой заданной положительной величины  $\varepsilon$ :

$$\beta = P[-\varepsilon < (a - \hat{a}) < +\varepsilon]; \quad (7.80)$$

$$\beta = P[(\hat{a} - \varepsilon) < a < (\hat{a} + \varepsilon)]. \quad (7.81)$$

Условие (7.81) означает вероятность того, что случайный интервал  $(\hat{a} - \varepsilon; \hat{a} + \varepsilon)$  содержит в себе достоверный, т.е. точный, но неизвестный показатель  $a$ , равна  $\beta$ .

Вероятность  $\beta$  называется доверительной вероятностью, интервал  $(\hat{a} - \varepsilon; \hat{a} + \varepsilon) = I_\beta$  – доверительным интервалом, а его границы  $(\hat{a} - \varepsilon; \hat{a} + \varepsilon)$  – доверительными границами.

Таким образом, если по результатам испытания (опыту эксплуатации) ограниченного числа РЭС определена оценка  $a$  показателя надежности и найдено значение  $I_\beta$  при заданной величине  $\beta$ , то по полученным данным можно утверждать, что с доверительной вероятностью  $\beta$  точное значение неизвестного показателя надежности  $a$  заключено между доверительными границами  $\hat{a} - \varepsilon$  и  $\hat{a} + \varepsilon$ , т.е. находится внутри интервала  $I_\beta$ .

Очевидно, что с увеличением количества испытываемых РЭС при той же доверительной вероятности  $\beta$  доверительный интервал  $I_\beta$  будет сужаться, а доверительные границы  $\hat{a} - \varepsilon$ ;  $\hat{a} + \varepsilon$  – сближаться. Точность оценок при этом повышается.

При решении практических задач отыскания доверительных интервалов при заданной величине  $\beta$  необходимо знать закон распределения случайной оценки  $a$  (напомним, что  $a$  – величина неслучайная). Если бы закон распределения  $a$  был известен, то задача нахождения  $\varepsilon$  и  $I_\beta$  решалась бы достаточно просто, достаточно было бы при заданной  $\beta$  найти такое значение  $\varepsilon$ , которое удовлетворяет условию (6.80), а затем вычислить  $I_\beta$ .

Так, например, при симметричной функции плотности распределения  $f(x)$  случайной величины  $x = a - \hat{a}$  уравнение для определения  $\varepsilon$  имеет вид

$$2 \int_0^E f(x) dx = \beta.$$

При несимметричном распределении  $\hat{a}$  требуется, чтобы вероятности попадания  $a$  в диапазон значений слева и справа от доверительного интервала были одинаковы и составляли

$$\frac{a}{2} = \frac{1 - \beta}{2}.$$

Тогда выражение (6.81) можно представить двумя уравнениями:

$$P(a < a_1) = \frac{a}{2}; \quad P(a_2 < a) = \frac{a}{2}, \quad (6.82)$$

где  $\bar{a}_1 = a^* - \varepsilon$ ;  $\bar{a}_2 = a^* + \varepsilon$  – соответственно нижняя и верхняя границы доверительного интервала.

Можно взять также другую пару уравнений:

$$P(a < a_1) = \frac{a}{2}; \quad P(a < a_2) = 1 - \frac{a}{2}.$$

Затруднение, однако, состоит в том, что закон распределения оценки  $\hat{a}$ , как уже упоминалось, зависит от закона распределения событий отказов и, следовательно, от его неизвестных параметров, в том числе и параметра (показателя)  $a$ . Для выхода из такого положения применяется приближенный способ, состоящий в том, что в получаемых на основе (6.81) аналитических значениях для  $I_\beta$  неизвестные параметры  $a$  заменяют их точечными оценками  $\hat{a}^*$ . Такой способ приемлем лишь при достаточно большом статистическом материале, когда число испытываемых на надежность РЭС составляет 30 – 40 единиц и более.

Чтобы устранить указанные трудности, на практике применяют специальный прием. Он основан на том, что в неравенствах вида (6.80), (6.81) переходят от случайной величины  $\hat{a}$  к некоторой функции от  $\hat{a}$ , но такой, что закон ее распределения не зависит от неизвестного параметра  $a$ , а зависит от числа испытаний и от вида закона распределения событий отказов.

Как было показано ранее, законы распределения (экспоненциальный, нормальный и др.) для событий отказа РЭС в настоящее время хорошо исследованы, что дает возможность применения точных методов оценки доверительных интервалов в практических задачах.

Пусть за суммарное время  $t_{\Sigma}$  однотипных РЭС произошло  $n$  отказов. Тогда среднее время наработки на один отказ будет равно

$$T_0 = t_{\Sigma} / n. \quad (6.83)$$

Величина  $T_0$  случайная. При другом аналогичном испытании  $n$  отказов может появиться при иной суммарной наработке. Поток отказов РЭС в процессе испытания можно считать простейшим пуассоновским потоком. Тогда вероятность появления  $k$  отказов за время  $t_{\Sigma}$  в соответствии с законом Пуассона

$$P_k \left( \frac{t_{\Sigma}}{T_0} \right) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{t_{\Sigma}}{T_0} \right)^k e^{-\frac{t_{\Sigma}}{T_0}}. \quad (6.84)$$

Вероятность появления  $n$  и более отказов

$$P_{k \geq n} \left( \frac{t_{\Sigma}}{T_0} \right) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{k!} \left( \frac{t_{\Sigma}}{T_0} \right)^k e^{-\frac{t_{\Sigma}}{T_0}}. \quad (6.85)$$

В выражениях (6.84), (6.85)  $T_0 = \frac{1}{\omega}$  – достоверное (точное) значение среднего времени наработки на один отказ;  $\omega$  – параметр потока отказов. Это величины неслучайные.

Вероятность (6.85) представляет собой интегральную функцию распределения случайной наработки  $t_{\Sigma}/T_0$  до появления  $n$  отказов. Введем новую переменную  $\chi^2 = 2t_{\Sigma}/T_0$  и запишем (6.85) в виде

$$P_{k \geq n}(\chi^2) = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\chi^2)^k}{2^k k!} e^{-\frac{\chi^2}{2}}. \quad (6.86)$$

Как видно из (6.86), функция  $\chi^2$  (хи-квадрант) зависит только от числа отказов  $n$  и не зависит от величины  $T_0$ .



Дифференцируя (6.86) по  $dx^2$ , получим функцию плотности распределения случайной величины  $x^2 = 2t_\Sigma/\Gamma_0$ :

$$f_n(x^2) = \frac{dP_{k \geq n}(x^2)}{dx^2} = - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{1}{2^k k!} \frac{d}{dx^2} \left| (x^2)^k e^{-\frac{x^2}{2}} \right| = \frac{(x^2)^{n-1}}{(n-1)! 2^n} e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (6.87)$$

Функция (6.87) отвечает известному в теории вероятностей так называемому  $x^2$ -распределению с  $2n$  степенями свободы. Кривая  $x^2$ -распределения приведена на рис. 6.10.

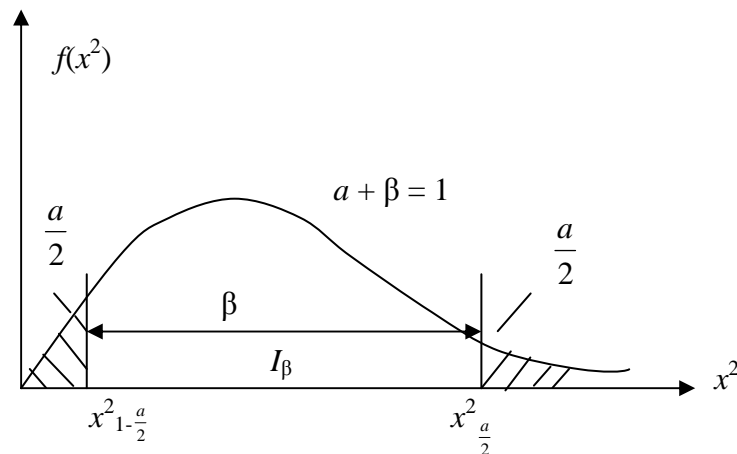


Рис. 6.10. Функция плотности  $x^2$ -распределения

Теперь рассмотрим порядок определения доверительного интервала при заданной величине  $\beta$ . Для этого обозначим через  $x^2_{1-\frac{a}{2}}$  нижнюю, через  $x^2_{\frac{a}{2}}$  – верхнюю границу доверительного интервала (см. рис. 6.10).

Тогда

$$P(x^2 < x^2_{1-\frac{a}{2}}) = \int_0^{x^2_{1-\frac{a}{2}}} f_n(x^2) dx^2 = \frac{a}{2}; \quad (6.88)$$

$$P(x^2 < x^2_{\frac{a}{2}}) = \int_0^{x^2_{\frac{a}{2}}} f_n(x^2) dx^2 = 1 - \frac{a}{2}. \quad (6.89)$$

Таким образом, с вероятностью  $\beta$  величина  $x^2$  находится в пределах

$$x_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 < x^2 < x_{\frac{\alpha}{2}}^2, \quad (6.90)$$

или с учетом принятого обозначения  $x^2 = 2t_{\Sigma}/T_0$

$$\frac{2t_{\Sigma}}{x_{\alpha/2}^2} < T_0 < \frac{2t_{\Sigma}}{x_{1-\alpha/2}^2}. \quad (6.91)$$

В правой и левой частях (6.91) записана соответственно верхняя и нижняя границы доверительного интервала для точного показателя надежности  $T_0$ , которые находятся по полученным в результате испытания РЭС значениям суммарной наработки  $t_{\Sigma}$  и числу отказов  $n$ .

Имея в виду, что  $P(t) = e^{-\frac{t}{T_0}}$ , с учетом (6.91) можно получить доверительный интервал для вероятности безотказной работы РЭС в течение времени  $t$ :

$$e^{-\frac{t}{T_1}} < P(t) < e^{-\frac{t}{T_2}}, \quad (6.92)$$

где

$$T_1 = \frac{2t_{\Sigma}}{x_{\alpha/2}^2}; \quad T_2 = \frac{2t_{\Sigma}}{x_{1-\alpha/2}^2}.$$

Так как  $\lambda = 1/T_0$ , то нетрудно найти доверительный интервал для интенсивности отказов

$$\frac{1}{T_2} < \lambda < \frac{1}{T_1}. \quad (6.93)$$

В ряде случаев достаточно знать лишь нижний предел одностороннего доверительного интервала. Он находится из условия удовлетворения требования: вероятность того, что точное значение  $T_0$  меньше  $\frac{2t_{\Sigma}}{x_{\alpha}^2}$ , должна быть не больше заданной вероятности  $\beta$ .

Отсюда следует:

$$T_0 \geq \frac{2t_{\Sigma}}{x_{\alpha}^2}. \quad (6.94)$$

*Пример.* Суммарная наработка поставленных на испытание ИМС составила 5000 ч. За время испытания отказали 14 ИМС. Оценим с доверительной вероятностью  $\beta = 0,9$  доверительную границу средней наработки до отказа.

Имеем:  $t_{\Sigma} = 5000$  ч;  $2t_{\Sigma} = 10000$  ч;  $n = 14$ ;  $2n = 28$ ;  $\alpha/2 = 0,05$ .

$$x_{0,95}^2 = 16,93; \quad x_{0,05}^2 = 41,3.$$

Таким образом,

$$T_1 = \frac{2t_{\Sigma}}{x_{\alpha/2}^2} = \frac{2 \cdot 5000}{41,3} \approx 242 \text{ ч};$$

$$T_2 = \frac{2t_{\Sigma}}{x_{\alpha/2}^2} = \frac{2 \cdot 5000}{16,93} \approx 614 \text{ ч}.$$

Отсюда

$$242 \text{ ч} < T_0 < 614 \text{ ч}.$$

Для одностороннего доверительного интервала

$$x_{0,1}^2 = 37,9; \quad T_0 \geq \frac{2\hat{t}_{\Sigma}}{x_{\alpha}^2} \approx \frac{2 \cdot 5000}{37,9} \approx 264 \text{ ч},$$

т.е. с вероятностью  $\beta = 0,9$  величина  $T_0$  не меньше, чем 264 ч.

Ранее был рассмотрен случай, когда поток отказов является простейшим пуассоновским потоком. При этом предполагалось, что на испытании находится достаточно большое число однотипных РЭС. На практике (особенно при испытании сложных комплексных РЭС) встречаются случаи, когда испытанию подвергается небольшое число однотипных устройств, например, 5, 10, 15, а о вероятности их безотказной работы судят по статистической оценке – частоте событий безотказной работы  $\hat{p} = m/n$  или частоте отказов  $q = 1 - p$ , где  $n - m$  – число отказавших устройств.

Оценка  $\hat{p}$  является состоятельной, а также несмещенной, т.к. математическое ожидание  $M[\hat{p}] = p$ . Дисперсия величины  $\hat{p}$  равна  $D[\hat{p}] = pq/n$ .

Можно показать, что эта дисперсия является минимально возможной, т.е. оценку  $p^*$  для точного значения  $p$  можно считать эффективной.

Очевидно, что в данном случае, когда число испытываемых РЭС мало, закон распределения оценки – частоты  $\hat{p}$  – отвечает биномиальному распределению – вероятность того, что ровно  $m$  устройств из  $n$  будут работать безотказно, определяется выражением

$$P_{m,n} = C_n^m p^m q^{n-m}. \quad (6.95)$$

Исходя из биномиального распределения оценки  $\hat{p}$  найдем доверительный интервал для точного, но неизвестного значения вероятности безотказной работы устройства  $P$ .

Допустим, что в процессе испытания в течение  $t$  часов  $k$  устройств работали безотказно, а  $n - k$  отказывали. Тогда точная оценка  $p = k/n$ .

Определим такое значение вероятности безотказной работы устройства  $P_2$ , при котором вероятность безотказной работы  $k$  и менее устройств из  $n$  равнялась бы  $\alpha/2$  (т.е. с вероятностью  $\alpha/2$  оценка  $p$  не превышала бы  $k/n$ ). Такое значение  $P_2$  с учетом (6.95) будет равно

$$\sum_{m=0}^k C_n^m P_2^m (1 - P_2)^{n-m} = \frac{\alpha}{2}. \quad (6.96)$$

Найдем далее такое значение вероятности безотказной работы устройства  $P_1$ , при котором вероятность безотказной работы  $k$  и более устройств из  $n$  также равнялась бы  $\alpha/2$ :

$$\sum_{m=0}^k C_n^m P_1^m (1 - P_1)^{n-m} = \frac{\alpha}{2}. \quad (6.97)$$

Нетрудно увидеть, что  $P_2$  и  $P_1$  – доверительные границы для  $P$ , так как с вероятностью  $\beta = 1 - \alpha$  при  $P_1 < P < P_2$  статистическая частота событий безотказной работы по результатам испытаний РЭС будет укладываться в тот же интервал  $I_R(P_1; P_2)$ .

Таким образом,

$$P_1 < P < P_2, \quad (6.98)$$

где  $P_1, P_2$  – решения уравнений (6.96), (6.97).

Значения  $P_1, P_2$  сводятся в таблицу для заданных  $\beta$  и различных  $n$  (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Доверительные границы  $P_1, P_2$  для  $\beta = 0,9$

$p$	$n = 5$		$n = 10$		$n = 15$		$n = 20$	
	$P_1$	$P_2$	$P_1$	$P_2$	$P_1$	$P_2$	$P_1$	$P_2$
0,8	0,43	0,97	0,56	0,96	0,61	0,93	0,67	0,90
0,9	0,54	0,99	0,68	0,99	0,72	0,98	0,78	0,97
1,0	0,69	1,00	0,83	1,00	0,89	1,00	0,93	1,00

*Пример.* На испытания в течение 500 ч поставлены 10 электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) новой конструкции. В процессе испытания отказала одна ЭЛТ. Оценим при  $\beta = 0,9$  доверительные границы вероятности безотказной работы в течение 500 часов и интенсивность отказов ЭЛТ.

По табл. 6.3 для  $p = 0,9$  и  $n = 10$  находим, что  $P_1 = 0,68$ , а  $P_2 = 0,99$ . Значит,  $0,68 < P < 0,99$ .

Так как  $P(t) = e^{-\lambda t}$ ,  $\lambda = -\frac{\ln P(t)}{t}$ , то с доверительной вероятностью 0,9 интенсивность отказов будет заключена в пределах  $0,2 \cdot 10^{-4} 1/\text{ч} < P < 7,8 \cdot 10^{-4} 1/\text{ч}$ .

## Глава 7. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ РЭС НА НАДЕЖНОСТЬ

### 7.1. Особенности организации испытаний РЭС на надежность

Как мы уже отмечали, вопросы организации испытаний, задачи сбора и обработки статистической информации являются одинаково важными при любых видах испытаний на надежность – определительных, специальных и совмещенных.

При организации испытаний РЭС на надежность необходимо учитывать следующие факторы:

- режим функционирования РЭС в процессе испытания (непрерывный, циклический);
- характер внешних воздействий (механические, климатические, электрические, комплексные, неразрушающий контроль, разрушающий физический анализ);
- объекты сбора и состав фиксируемой информации;
- формы учетно-отчетной документации;
- правила прекращения испытаний;
- состав, обязанности и ответственность операторов (контролеров) испытательных групп.

От степени проработки и учета указанных факторов при подготовке испытаний зависит достоверность получаемых оценок показателей надежности РЭС.

Рассмотрим последовательно содержание указанных выше факторов.

**Режим функционирования.** Наиболее полную информацию можно получить при непрерывном контроле процесса испытания, когда достаточно точно фиксируются моменты отказов РЭС. Однако такие условия не всегда могут быть обеспечены.

Если задан уровень показателей надежности и специально не оговорены соответствующие условия, то при испытаниях следует обеспечить наиболее характерные для данного изделия условия функционирования.

Периодический контроль обеспечивает фиксацию отказов изделий в определенные планом испытаний промежутки времени. Для статистической обработки результатов испытаний желательно заданное или расчетное время испытаний делить на 10 – 15 контрольных периодов.

**Характер внешних воздействий.** К числу внешних факторов, воздействующих на РЭС, относятся повышенная и пониженная температура среды;

быстрая, постепенная и резкая смена температур; повышенная влажность; соляной туман; солнечная радиация; динамическая и статическая пыль; повышенное и пониженное атмосферное давление; плесневые грибы; синусоидальная и широкополосная случайная вибрация; механические удары одиночного и многократного действия; угловые и линейные ускорения; акустические шумы; факторы космического пространства (по специальной программе).

В табл. 7.1 представлены в качестве примера виды испытаний и контроля, проводимых в региональном испытательном центре сертификации радиоэлектронной техники «Электронстандарт» (г. Санкт-Петербург). Там же приведены характеристики используемого испытательного оборудования.

Для проведения испытаний на воздействующие факторы «Электронстандарт» использует отечественные комплексы «Климат-6», «Климат-7», «Мороз-5», «Мороз-6», а также международные и зарубежные стандарты качества – МЭК, ИСО, MIL-std, Vin, Vs и другие.

Таблица 7.1

**Виды испытаний и характеристики испытательного оборудования**

Виды испытаний и контроля	Общие технические характеристики испытательного оборудования	Представляемые типы испытательного оборудования
1	2	3
<b>Механические воздействия</b>		
Вибрационные испытания	Диапазон частот – 10 – 10000 Гц	УВЭ-1/10000
	Максимальное виброускорение – до 400 (40) м/с <sup>2</sup> (g)	УВЭ-1/004
	Грузоподъемность – до 5 кг	УВЭ-5/10000
Механические удары одиночного действия	Пиковое ударное ускорение – от 15000 до 500000 (1500-50000) м/с <sup>2</sup> (g)	К-5/3000
	Длительность ударного импульса – от 0,1 до 1,0 м·с	К-0,1/10000
		К-0,1/30000
Механические удары многократного действия	Пиковое ударное ускорение – 5 – 150 g	К-0,1/50000
	Длительность ударного ускорения – от 1 до 20 м·с	УУЭ-20/200
Линейное ускорение	Величина постоянного линейного ускорения по осям X, Y, Z – 500000 (50000) м/с <sup>2</sup> (g)	G-385-1B (USA)
Акустическое воздействие	Диапазон частот – 125 – 10000 Гц Уровень звукового давления – до 160 дБ	АУ-1
Биологическое воздействие (плесневые грибы)	Температура – 29 °С Относит. влажность – до 100 %	Термостатная комната

1	2	3
Климатические воздействия		
Повышенная температура среды	Диапазон температур – от нормальной до 350 °С	КТ-0,4-350
	Максимальный рабочий объем камер – до 0,5 м <sup>3</sup>	12КТ-0063-026
Пониженная температура среды	Диапазон температур – от нормальной до –85 °С	УМТ07/64, Германия
	Максимальный рабочий объем камер – до 0,4 м <sup>3</sup>	МС-81, Япония
Изменение температур	Диапазон изменения температур – от –65 до 200 °С Рабочий объем – до 0,02 м <sup>3</sup>	2КТЦ-65/200
Повышенная влажность среды при повышенной температуре	Диапазон температур – 40 – 90 °С Относит. влажность – до 95 %	12КТВГ0,4-0,01
	Рабочий объем – до 0,4 м <sup>3</sup>	
Соляной туман	Диапазон температур – от 25 до 90 °С	12КТМТ-0.4-001
	Дисперсность тумана – 1 – 10 мкм	
	Водность аэрозоля – 2 – 3 г/м <sup>3</sup>	
	Рабочий объем – до 0,4 м <sup>3</sup>	
Солнечная радиация	Диапазон температур – 50 – 70 °С	КСР-1
	Интегральная плотность излучения – 1120 Вт/м <sup>2</sup>	
	В УФ части спектра – 68 Вт/м <sup>2</sup>	
	Рабочий объем – до 0,4 м <sup>3</sup>	
Динамическая пыль	Скорость обдува пылевым потоком – 15 м/с	КП-3-0,5М
	В УФ части спектра – 68 Вт/м <sup>2</sup>	
	Рабочий объем – до 0,4 м <sup>3</sup>	
Статическая пыль	Диапазон температур – 25 – 60 °С	КП-016-001
	Скорость пылевого потока – 0,5 м/с	
Конденсированные осадки (дождь)	Интенсивность дождя – 3 – 10 мм/мин Рабочий объем – 0,4 м <sup>3</sup>	КД-0,4 12КТХБ-0,4 65/155/133

## 7.2. Объекты сбора и состав фиксируемой информации

Правильный выбор объектов сбора статистической информации, в особенности для сложных РЭС, является непростой задачей. При слишком мелком делении РЭС на самостоятельные объекты сбора статистической информации усложняется работа с учетной документацией, что неизбежно ведет к снижению достоверности получаемых результатов. При чрезмерном укрупнении объектов сбора статистики может потеряться необходимая детальная информация о причине, месте отказа и о фактической наработке отдельных блоков и устройств РЭС.

Особенностью статистической оценки показателей надежности является большой объем сведений, который необходимо фиксировать в каждом случае нарушения функционирования. Поэтому в процессе испытаний на надежность необходимо обеспечивать фиксацию следующей информации:

- общая наработка изделия и время работы от момента предыдущего отказа;
- используемые методы диагностики и место обнаружения отказа, заводской и позиционный номер отказавшего элемента, детали;
- причина отказа (поломка, износ детали, отклонение параметра и т.п.);
- способ устранения отказа (замена элемента, регулировка и т.д.);
- условия среды в момент отказа объекта испытания (температура, вибрация, удары и другие факторы, в том числе манипуляции персонала, проводящего испытания).

Достоверность первичной информации обеспечивается полнотой и регулярностью ее фиксации, а также глубиной и объективностью анализа причин отказов. Следует иметь в виду, что недостоверные первичные данные невозможно скорректировать даже самой тщательной статистической обработкой результатов испытаний.

### **7.3. Формы учетно-отчетной документации**

Наиболее распространенными учетными документами при испытаниях на надежность являются журнал испытаний и карточка учета отказов. Журнал служит для оператора, проводящего испытания, своеобразным формуляром, в котором в хронологическом порядке отражается состояние РЭС – время и дата начала и окончания испытания; правильность функционирования; моменты обнаружения отказов и их внешние признаки; время восстановления (поиск и устранение отказа) и т.д.

В журнал записываются также все замечания обслуживающего персонала по качеству функционирования, удобству обслуживания и ремонта. Записи в журнале используются для заполнения карточки учета отказов (неисправностей).

Карточки учета отказов (неисправностей) применяются для накопления статистической информации об отказах РЭС по различным признакам, на основании которой разрабатываются мероприятия по повышению надежности конкретных типов изделий.

Правила прекращения испытаний, состав, обязанности и ответственность операторов испытательных групп зависят от типа РЭС и указываются в НТД.



### *Качественный анализ отказов и предварительная обработка результатов испытаний РЭС*

Основными задачами качественного анализа являются объединение и классификация статистической информации, полученной при испытании РЭС.

Важным средством увеличения объема статистической информации является объединение сведений об отказах и наработке однотипных изделий, полученных при испытаниях однотипной продукции на различных предприятиях. При этом возможность и целесообразность объединения информации должны быть обоснованы инженерными соображениями.

С точки зрения задач статистической оценки надежности наиболее важными считаются две группы классификации отказов – по причинам возникновения и по отношению к оцениваемым показателям надежности.

#### *Классификация отказов по причинам возникновения*

Здесь выделяются следующие группы отказов: конструктивные, технологические, производственные и эксплуатационные. Для программно управляемых изделий, кроме перечисленных, можно выделить еще алгоритмические и программные.

В результате ошибок или недоработок в алгоритмах или программах даже исправные изделия в ряде случаев не в состоянии выполнять свои функции. Для таких отказов характерно то, что они проявляются одинаково во всех однотипных РЭС при возникновении соответствующих условий.

#### *Классификация отказов по отношению к оцениваемым показателям надежности*

Она предусматривает деление отказов на *учитываемые* и *неучитываемые*. При этом к неучитываемым относятся:

- отказы, вызванные внешними факторами, не предусмотренными НТД на изделие, а также отказы из-за нарушений инструкций по технической эксплуатации;
- отказы опытных образцов, причины которых устраняются в процессе доработок;
- отказы, не влияющие на конкретный оцениваемый показатель.

Схема, поясняющая принцип классификации отказов РЭС по отношению к показателям надежности РЭС, приведена на рис. 7.1.

В заключение перечислим наиболее характерные ошибки при организации испытаний РЭС на надежность, ошибки при сборе и первичной обработке статистической информации:

- ошибки при классификации отказов, которые в основном являются следствием неправильной интерпретации тех или иных классификацион-

ных признаков в конкретной ситуации. Например, часто трудно отличить случайное нарушение инструкции обслуживающим персоналом от естественной ошибки, обусловленной несовершенством изделия или низким качеством технической документации;



Рис. 7.1. Классификация отказов при испытаниях РЭС

– отклонение от установленных для РЭС регламентных работ. Например, часть регламентных работ не проводится из-за дефицита времени или отсутствия соответствующих специалистов. Полученные в этих условиях результаты испытаний, очевидно, могут значительно отличаться от тех, которые были бы получены при установленной системе технического обслуживания;

– отклонения от установленных для данного изделия правил ремонта. Сюда относятся: применение случайного инструмента, ремонтного оборудования, не предназначенного для восстановления изделия, нарушение установленной технологии ремонта и технологической документации;

- исключение из оценки надежности отказов, по которым проведены доработки. Такие отказы можно исключать только в том случае, когда доработка исключает возможность их появления в принципе;

- отнесение к учитываемым отказов, не имеющих отношения к оцениваемому показателю надежности. Примерами таких ситуаций могут быть остановки вычислительных устройств из-за недоработок алгоритмов или программ, случаи брака продукции или остановки автоматических линий при определенных отклонениях физико-химических свойств сырья или параметров заготовок. Внешне такие отказы выглядят как нарушение нормальной работы РЭС.

#### **7.4. Использование системы контроля качества для достижения высокой надежности РЭС**

*Комплексное управление качеством и процесс обеспечения надежности РЭС*

Как мы уже отмечали в главе 1, надежность является одним из важнейших свойств РЭС. Очень важно учитывать связи, существующие между концепцией всестороннего, комплексного контроля качества, и одним из элементов качества – надежностью. Ответственностью за качество РЭС и задачей ее обеспечения проникнуты все организационные структуры современного предприятия. Это утверждение верно для всех элементов качества, в том числе и для надежности. Отличие состоит лишь в конкретных заданиях по вопросам надежности, поручаемых конкретным специалистам в этой области.

Рассмотрим на примере лишь трех операций возможные мероприятия по проведению всестороннего контроля качества с целью получения гарантированного уровня надежности выпускаемых РЭС. В качестве таких операций возьмем:

- контроль за разработкой конструкции РЭС;
- входной контроль материалов и комплектующих изделий;
- контроль готовой продукции.

*Контроль за разработкой конструкции РЭС*

Сюда входят следующие мероприятия по обеспечению требуемого уровня надежности:

- разработка ведомственного стандарта на надежность согласно требованиям нормативно-технической документации на разрабатываемые изделия;

- четкое определение тех условий, в которых будут эксплуатироваться изделия;
- оптимизация конструкции изделий для достижения требуемого уровня надежности;
- оценка экономического баланса между надежностью и суммарными затратами на ее достижение;
- выбор таких технологических процессов, с помощью которых можно достичь высокого уровня надежности;
- проведение испытаний головных образцов и опытных партий для обеспечения требуемого уровня надежности;
- модификация конструкции изделий и технологических процессов, направленная на устранение в максимально возможной степени всех факторов, влияющих на снижение надежности;
- анализ и регулирование гарантийных обязательств по обеспечению надежности разрабатываемых изделий;
- сравнение и оценка надежности конкурирующих изделий.

#### *Входной контроль материалов и комплектующих изделий*

Эта операция является одной из важнейших в обеспечении надежности и предусматривает:

- предоставление поставщикам обоснованных требований по надежности их продукции;
- непрерывную оценку надежности продукции, поставляемой поставщиками;
- оценку возможности производить продукцию с требуемым уровнем надежности с учетом реальной надежности продукции поставщиков;
- оказание технологической помощи поставщикам с целью повышения надежности выпускаемых изделий.

#### *Контроль готовой продукции*

К мероприятиям этой операции можно отнести:

- постоянный контроль изделий и технологических процессов для достижения гарантированного уровня надежности;
- организацию рекламационной работы и обмена информацией между изготовителем и потребителями выпускаемых изделий;
- **предоставление потребителю** гарантий надежности приобретенных изделий;
- систематическую оценку надежности выпускаемых изделий при их эксплуатации и транспортировке;

– поддержание достигнутого уровня надежности, осуществляемое на основе разработанных поставщиком правил и технических инструкций по обслуживанию, эксплуатации и ремонту изделий;

– оценку характеристик надежности изделий при их эксплуатации с учетом затрат на ее обеспечение.

Перечисленные выше мероприятия по обеспечению высокой надежности РЭС требует пояснений, связанных с их практической реализацией на современных предприятиях радиоэлектронного комплекса. К сожалению, общий спад промышленного производства в 1990 – 2000 гг. в России отразился и на качестве изделий электронной техники. В эти годы были прекращены фундаментальные, прогнозные, поисковые, научные исследования и разработки в области обеспечения качества и надежности изделий электронной техники, расширения их номенклатуры. Практически перестала действовать система сбора и анализа данных о качестве и надежности РЭС в процессах производства и эксплуатации. Во многом морально устарело технологическое, испытательное и контрольно-измерительное оборудование.

Входной контроль в полном объеме часто проводился только при комплектации наиболее важных заказных (например, космических) объектов.

Подобные негативные факторы привели к тому, что в 1998 – 2002 гг. произошло около 45 % отказов РЭС, выпущенных на предприятиях радиоэлектронного комплекса, по причинам отказов изделий электронной техники. Выявлено также, что более 50 % РЭС не соответствуют требованиям ремонтпригодности – среднее время восстановления РЭС превышает требуемое на 1 – 2 порядка из-за больших сроков изготовления и поставки сменных сборочных единиц.

В настоящее время наметилось определенное оживление производства отечественных изделий электронной техники. Возрастают номенклатура и объемы выпуска современных радиоэлектронных средств.

## **7.5. Ускоренные испытания РЭС на надежность**

Сложность и ответственность задач, решаемых с помощью современных РЭС, предъявляют весьма высокие требования к их надежности. Так, даже не очень сложные РЭС могут содержать до  $10^6$  элементов. При значении интенсивности отказов элементов  $\lambda = 10^{-6}$ , 1/ч, средняя наработка

до отказа  $T_{cp}$  (или на отказ  $T_o$  для восстанавливаемых систем) такой аппаратуры составляет один час, т.е. практически она оказывается неработоспособной.

Наблюдается также тенденция к увеличению технического ресурса  $t_p$  с определенными показателями надежности. Как правило, задаваемые вероятности безотказной работы  $P(t_p) = 0,9 - 0,99$  при весьма больших значениях  $t_p$ .

Для определения соответствия РЭС таким высоким требованиям надежности необходимо проведение испытаний больших объемов выборок. При этом время испытаний и затраты на них увеличиваются.

Перечисленные затруднения являются причиной поиска таких методов, которые позволили бы сократить продолжительность и объем выборки испытаний. Ускоренные испытания имеют цель выявить изменение параметров элементов и сборочных единиц РЭС при сокращении длительности испытаний за счет интенсификации режимов работы и условий эксплуатации РЭС.

В общем случае величину, показывающую, во сколько раз уменьшается значение показателей долговечности или срока сохраняемости при испытаниях относительно заданных значений показателей долговечности или срока сохраняемости в эксплуатации, называют коэффициентом ускорения испытаний

$$K_y = t_H/t_y = \lambda_y/\lambda_H,$$

где  $t_H, t_y$  – время испытаний в нормальном и ускоренном режимах соответственно;  $\lambda_y, \lambda_H$  – интенсивности отказов в указанных режимах.

Ускорение испытаний РЭС обычно достигается ужесточением воздействующих факторов (температуры, влажности, электрических, механических и других нагрузок).

Основной научной проблемой теории испытаний, в том числе и ускоренных, является разработка и исследование моделей объектов и процессов их старения и изнашивания. Наиболее часто в качестве модели старения и изнашивания принимают математическую модель в виде однородной или неоднородной марковской цепи. Исходя из модели процессов износа и старения можно выделить три основных метода ускорения испытаний (рис. 7.2).

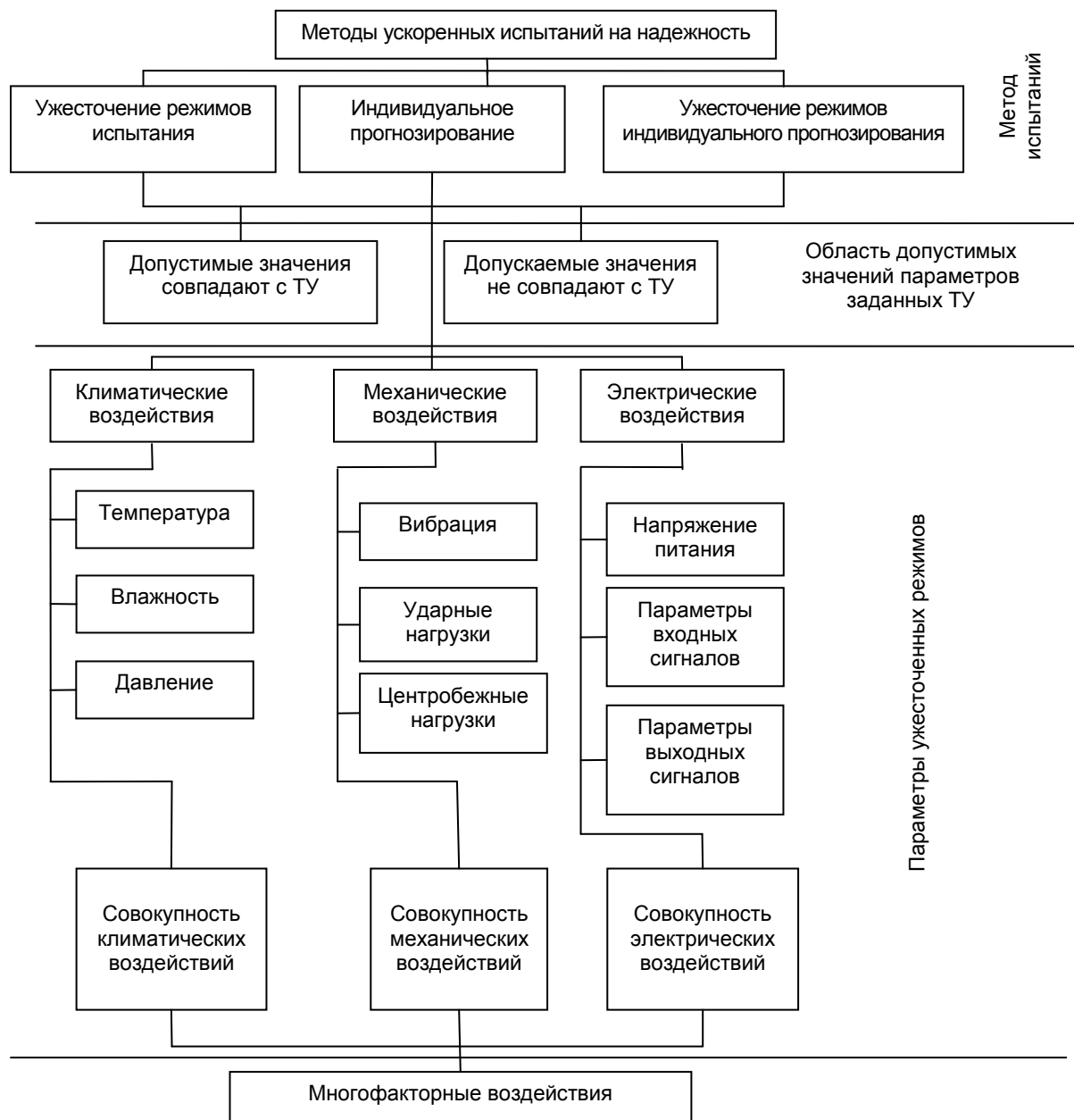


Рис. 7.2. Основные методы ускоренных испытаний

**Первый метод**, называемый *форсированными испытаниями*, заключается в *ужесточении режимов испытаний*. В этом режиме, как правило, превышаются предельные значения, при которых еще сохраняется нормальная работа РЭС.

Недостатками подобного метода испытаний являются:

- возможность непредвиденного изменения физико-химических процессов старения, износа или самовосстановления элементов и сборочных единиц;

- практическая невозможность числовой оценки корреляции между значениями параметров испытаний в нормальных и в ужесточенных режимах;

- невозможность количественных оценок показателей надежности испытуемых изделий – технического ресурса, времени наработки на отказ, сохраняемости и т.п.

В силу этих особенностей первый метод ускорения можно применять при сравнительных или контрольных испытаниях. Для проведения определительных испытаний этот метод ускорения практически непригоден.

**Второй метод ускоренных испытаний основан на временной оценке поведения прогнозируемого параметра.** В данном случае учитывается эволюционная тенденция развития процессов старения и изнашивания и тем самым определяется момент отказа. Для высоконадежных РЭС возможны варианты прекращения испытаний до наступления отказа. В качестве прогнозируемых показателей могут быть показатели качества изделия либо функции этих показателей.

Основными недостатками второго метода ускоренных испытаний являются:

- трудность нахождения прогнозируемых параметров (особенно в сложных РЭС), связанная с учетом одновременно действующих многочисленных факторов;

- ограниченная возможность установления предельно допустимых режимов функционирования РЭС, что не позволяет с высокой достоверностью прогнозировать моменты их отказа;

- малые значения коэффициентов ускорения, которые лежат в пределах 2,0 – 3,5.

В силу изложенных особенностей второй метод целесообразно применять для определительных испытаний, а также в случае необходимости разделения изделий по качественным группам. Кроме того, этот метод находит применение при ускоренных неразрушающих испытаниях.

**Третий метод ускоренных испытаний заключается в совместном применении первого и второго метода.** Для третьего комбинированного метода ускоренных испытаний характерны следующие недостатки:

- невозможность проведения одновременного испытания нескольких изделий;

- сложность вычислительных процедур.

При анализе недостатков каждого метода ускоренных испытаний необходимо учитывать, что широкое применение цифровой вычислительной техники в основном исключает все недостатки, связанные с большим объемом вычислений. Очевидно, что для повышения эффективности испытаний на надежность и снижения затрат следует, где возможно, увеличивать



объемы вычислений, если они приводят к упрощению или сокращению сроков самих испытаний.

Методику ускоренных испытаний РЭС обычно разрабатывают на основе нормативно-технической документации с учетом специфики функционирования, назначения, условий эксплуатации и конструктивных особенностей РЭС. Проводить ускоренные испытания допускается только в технически обоснованных случаях в соответствии с НТД на изделие.

При ускоренных испытаниях необходимо, чтобы критерий распределения отказов во времени и по причинам соответствовал критерию и распределению при нормальных испытаниях на надежность.

Постановка задачи, последовательность организации ускоренных испытаний и выбор параметров воздействующих факторов иллюстрируются схемой, приведенной на рис. 7.3.

Форсирование испытаний вновь разрабатываемой и серийно выпускаемой аппаратуры организуется по этапам:

- разработка методики выбора форсирующих факторов и форсирующего режима (на основании имеющихся статистических данных) для обеспечения максимально возможного ускорения испытаний. При этом физическая природа возникновения отказов должна оставаться неизменной;
- определение интервальных значений коэффициента ускорения при различных внешних воздействующих факторах и нахождение различных законов распределения времени безотказной работы РЭС;
- определение динамики распределения и выявления причин отказов во время нормальных испытаний (учет принципа наследственности);

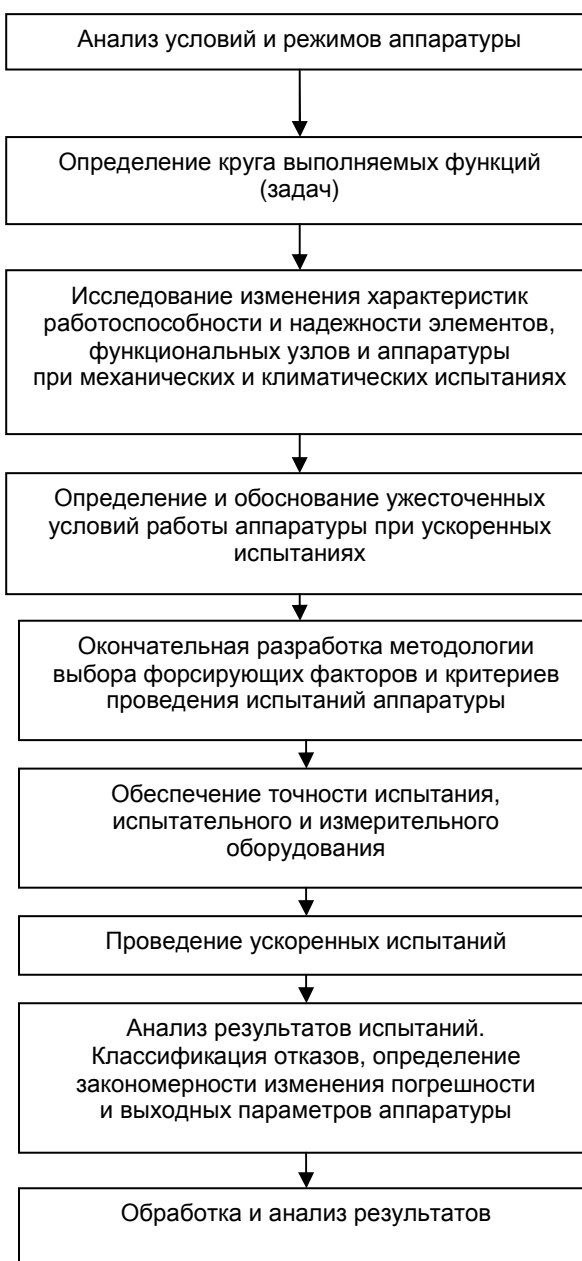


Рис. 7.3. Схема последовательности организации ускоренного испытания РЭС на основе информационных потоков

- оценка зависимости между вероятностями безотказной работы в нормальном и форсированном режимах;
- формирование исходных данных по проведению ускоренных испытаний на надежность.

Для окончательного уточнения данных условий и времени форсированных испытаний необходимо учитывать время технологической наработки испытываемых РЭС. Как известно, проведение технологической наработки позволяет выявлять и устранять скрытые дефекты, допущенные в процессе проектирования, производства и испытания.

Условия нормального и ускоренного испытаний РЭС приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Условия нормального и ускоренного испытаний РЭС

Вид испытания	Параметр	Режим		Дополнительные условия
		Нормальный	Ускоренный	
На виброустойчивость	Диапазон частот, Гц	20 – 5000	20 – 20000	По программе испытания
	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	100	400	
	Продолжительность, ч	1 – 8	0,1 – 2	
На вибропрочность методом качающихся частот, методом фиксированных частот	Число циклов качания	72 – 240	18 – 60	
	Продолжительность, ч	6 – 48	1,5 – 6	
	Продолжительность, ч	1 – 6	0,1 – 1,5	
На ударную прочность: одиночное  многократное	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	40 – 10000	60 – 30000	
	Длительность удара, м·с	60 – 0,2	40 – 0,05	
	Число ударов	5000 – 400	3000 – 200	
	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	40 – 1000	400 – 2000	
	Длительность удара, мс	15 – 2	10 – 1	
На теплоустойчивость	Температура, С	20 – 70	40 – 105	По условиям испытаний в зависимости от массы аппаратуры
	Продолжительность, ч	2 – 4	0,5 – 2	
На влагуустойчивость	Число циклов	4 – 12	4 – 18	По степени жесткости и группе исполнения
	Температура, °С	40 ± 2	55 ± 2	
	Относительная влажность, %	65 + 15	95 + 3	
	Продолжительность, ч./сутки	4 – 56	4 – 14	
На изменение напряжения сети	Температура, °С	25 ± 10	40 ± 2	Напряжение сети увеличивают после установления рабочего режима
	Напряжение, В	$U_H$	(1,1 – 1,2) $U_H$ , частота 50 Гц (1,05 – 1,1) $U_H$ , частота 400 Гц	
	Продолжительность, ч	24 – 48	4 – 10	

Примечание.  $U_H$  – номинальное напряжение.

## 7.6. Краткая характеристика надежности элементов РЭС

В технических условиях на сложные системы РЭС выдвигается требование безотказного режима функционирования в течение  $10^3 - 10^4$  ч. Требуемая величина  $\lambda_i$  при этом должна быть порядка  $10^{-9} - 10^{-10}$ , 1/ч, а с учетом снижения надежности за счет междусхемных соединений – еще меньше. Применение пленочных и полупроводниковых интегральных микросхем (ИМС) позволяет решить эту задачу. Если исходить из числа элементов, то ИМС позволяют получить выигрыш в надежности в 10 – 30 раз [28].

С точки зрения обеспечения надежности трудно назвать существенные различия между гибридными и полупроводниковыми ИМС. Величины интенсивностей отказов элементов гибридных ИМС при  $t = 65$  °С и коэффициенте нагрузки  $K_H = 0,7$  от номинального значения приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

**Значения интенсивности отказов элементов гибридных ИМС**

Элементы гибридных ИМС	$\lambda, 1/\text{ч}$
Навесные транзисторы и диоды	$5 \cdot 10^{-8}$
Тонко- и толстопленочные резисторы	$1 \cdot 10^{-9}$
Тонкопленочные $\text{Ta}_2\text{O}_5$ - конденсаторы	$8 \cdot 10^{-9}$
Навесные керамические конденсаторы	$5 \cdot 10^{-10}$
Навесные полистироловые конденсаторы	$7 \cdot 10^{-10}$
Керамические подложки	$5 \cdot 10^{-10}$

Для ИМС наиболее характерны внезапные отказы, обусловленные качеством их производства – обрывы и короткие замыкания внутренних соединений, разрывы соединений между контактной зоной на поверхности подложки (кристалла) и выводами корпуса. Внезапные отказы полупроводниковых ИМС составляют до 80 % от общего числа отказов. Более 50 % отказов гибридных линейных ИМС связано с дефектами транзисторов и паяных соединений. Исследование причин отказов золотых проволочных выводов ИМС показало, что их отказы чаще всего происходят из-за обрыва проволоки около шарика Ковара.

Наиболее слабым звеном полупроводниковых ИМС транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) в пластмассовых корпусах являются внутренние проволочные соединения, по причине которых возникают короткие замыкания и разрывы электрических цепей (более 90 % отказов связано с обрывами в электромонтажной схеме). Основная причина подобных отказов заключается в различии температурных коэффициентов линейного расширения элемента и обволакивающего материала, что приводит к возникновению термомеханических напряжений.

Коррозия алюминиевой металлизации может вызвать образование шунтирующих утечек и коротких замыканий в ИМС. ИМС с керамическими корпусами обладают более высокими характеристиками надежности.

Результаты испытаний элементов РЭС приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Результаты испытания РЭС

Элементы РЭС	Испытано, шт.	Брак по ТУ		ПН*		Всего	
		шт.	%	шт.	%	шт.	%
Микросхемы	1489	51	3,38	63	4,17	114	7,55
Транзисторы	944	50	5,30	18	1,91	68	7,20
Диоды	1598	25	1,54	31	1,91	56	3,45
Стабилитроны	238	2	0,84	2	0,84	4	1,68
Конденсаторы	6718	58	0,86	29	0,43	87	1,30
Резисторы	9318	67	0,72	38	0,41	105	1,13
Соединители	587	2	0,34	?	?	2	0,34
Фильтры	415	1	0,24	1	0,24	2	0,48
Дроссели	413	5	1,16	4	0,93	9	2,09
Трансформаторы	193	?	?	2	1,04	2	1,04

ПН\* – потенциально ненадежные.

Проведение испытаний и совершенствование технологического процесса производства РЭС позволяют корректировать показатели надежности ИМС в сторону их повышения.

### 7.7. Условия проведения форсированных испытаний на надежность

Допустим, что проводятся два испытания  $P_x^o$  и  $P_x^\phi$  однотипных устройств РЭС с целью оценки количественной характеристики надежности параметров  $X$ .

Испытание  $P_x^\phi$  считается форсированным относительно испытания  $P_x^o$ , если время испытания в форсированном режиме  $\tau_x^\phi$  меньше времени  $\tau_x^o$  испытания в нормальном режиме. Кроме того, должны соблюдаться следующие условия:

- в форсированном режиме  $E_x^\phi$  испытываемые устройства должны отказывать раньше, чем в нормальном режиме  $E_x^o$   $E_x^\phi$ ;
- при квалификационных испытаниях  $P_x^o$  и  $P_x^\phi$  должны быть равны точности результатов, а при контрольных могут быть получены ошибки первого и второго рода ( $\alpha^\phi = \alpha^o$ ;  $\beta^\phi = \beta^o$ ).

Испытание не считается форсированным, если сокращение времени  $z_x^*$  достигается лишь за счет сокращения объема выборки.

Степень сокращения испытаний на надежность определяется с помощью временного  $K_\tau$  и нагрузочного  $K_n$  коэффициентов. Временной коэффициент равен отношению

$$K_\tau = \tau^0 / \tau^\Phi, \quad (7.1)$$

где  $\tau^0$  – продолжительность испытания, в течение которой при номинальной нагрузке фиксируется определенное число отказов;  $\tau^\Phi$  – продолжительность испытания, в течение которого при форсированной нагрузке фиксируется то же число отказов.

Отношение числа отказов  $n^\Phi$ , выявленных при форсированных испытаниях за время  $\tau^\Phi$ , к числу отказов  $n^0$ , выявленных при нормальных условиях испытаний за то же время  $\tau^0$ , называется нагрузочным коэффициентом, т.е.

$$K_n = n^\Phi / n^0. \quad (7.2)$$

Проведение форсированных испытаний связано с необходимостью выбора критерия, с помощью которого можно было бы оценить характеристики надежности в режимах  $E^0$  и  $E^\Phi$ . В качестве такого критерия иногда используется коэффициент подобия

$$K = T^0 / T^\Phi, \quad (7.3)$$

где  $T^0$ ,  $T^\Phi$  – средние наработки до отказа (на отказ для восстанавливаемых устройств) в условиях нормальных и форсированных испытаний.

В общем случае с увеличением коэффициента подобия  $K$  время испытания уменьшается. Однако пределы изменения коэффициента подобия ограничены. Связано это с тем, что, например, повышение или понижение температуры даже в допустимых по ТУ пределах вызывает изменение параметров как отдельных элементов, так и целиком компоновочных схем РЭС.

Произвольное изменение (с целью сокращения времени испытания на надежность) в широком диапазоне электрических нагрузок, нагрева или охлаждения, механических и других воздействий может привести к изменению физических свойств конструкционных материалов и комплектующих элементов РЭС.

Необходимо также учитывать, что изменения электрического сопротивления поверхностных и композиционных резисторов в зависимости от температуры являются обратимыми, если температура не превышает предельно допустимую, в противном случае происходит необратимое изменение электрического сопротивления резистора. У германиевых транзисторов с увеличением температуры на  $10^\circ\text{C}$  примерно в 2 раза увеличивается

обратный ток через коллекторный переход. С увеличением температуры уменьшается сопротивление изоляции РЭС, возрастает тангенс угла диэлектрических потерь и паразитная емкость, что, в свою очередь, приводит к увеличению уровня потерь и ухудшению стабильности работы схем.

– Зависимости коэффициентов подобия от условий и режимов испытаний устанавливаются в процессе предварительных исследований.

Численные значения коэффициентов подобия  $K$  некоторых элементов приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5

**Значения коэффициентов подобия**

Элементы	Коэффициент подобия $K$			
	$K_n=1$	1,3	1,7	2,0
Резисторы	2,2	3,8	5	1,5
Конденсаторы	3	8,2	27	67
Кристаллические диоды	27	45	89	134

Данные табл. 7.5 соответствуют коэффициентам при условиях:

- режим  $E^0, t = 30\text{ }^\circ\text{C} (T^0)$ ;
- режим  $E^\Phi, K_n = Var, t = 75\text{ }^\circ\text{C} (T^\Phi)$ .

Длительность форсированных испытаний на надежность определяется по формуле

$$\tau = \tau^0 / K, \tag{7.4}$$

где  $\tau^0$  – заданное время испытания в режиме  $E^0$ .

В случае экспоненциального распределения среднее время наработки до отказа можно принять равным

$$T^\Phi = N\tau^\Phi, \tag{7.5}$$

где  $N$  – количество испытываемых устройств;  $\tau^\Phi$  – наработка устройств в форсированном режиме до появления первого отказа.

Средняя наработка до отказа  $T_0$  с учетом (7.5) определяется из зависимости

$$T_0 = KT^\Phi = KN\tau^\Phi. \tag{7.6}$$

Выше уже отмечалось, что форсированные испытания на надежность имеют ряд очевидных преимуществ: можно значительно сократить время и затраты на процесс испытаний. В то же время при практической реализации форсированных испытаний на надежность возникают определенные проблемы. Связаны они, прежде всего, с тем, что для большинства типов

РЭС не установлены функциональные зависимости между показателями надежности нормальных и форсированных испытаний.

Важно также иметь в виду, что при форсированных испытаниях имеется определенный предел, за которым вступают в силу факторы, отсутствующие в реальных условиях эксплуатации РЭС. Из-за влияния этих факторов оценка качества любого изделия, в том числе и важнейшего его показателя – надежности, полученная при ускоренных испытаниях, может оказаться искаженной или совершенно ошибочной.

Существует множество таких РЭС, ускоренное испытание которых просто невозможно. К ним, в частности, относятся определенные виды электронно-лучевых трубок.

### **7.8. Контроль показателей надежности при заданных планах испытаний**

Контроль показателей надежности в процессе испытаний имеет цель обеспечить приемку РЭС с уровнем надежности  $R \geq R_{TP}$  и их браковку при  $R < R_{TP}$ , где  $R_{TP}$  – требуемый уровень надежности РЭС данного типа.

Как отмечалось ранее, вероятность приемки любого устройства в зависимости от его качества, в том числе и его важнейшего показателя – надежности оценивается с помощью оперативной характеристики плана контроля. На рис. 7.4 показаны два вида оперативных характеристик плана контроля надежности – идеальная и реальная.

Получение идеальной оперативной характеристики с уровнем надежности  $R_{TP}$  связано с необходимостью проведения испытания очень большого объема выборки однотипных изделий РЭС, что практически можно считать недопустимым. На реальной оперативной характеристике указываются уровни приемочного  $R_0$  и браковочного  $R_1$  показателей надежности и соответствующие этим уровням вероятности рисков поставщика  $\alpha$  и заказчика  $\beta$ .

Как видно из рис. 7.4,  $\alpha = 1 - L(R_0)$ , а  $\beta = L(R_1)$ . Изделия с уровнем надежности  $R \geq R_0$  считаются удовлетворяющими техническим требованиям и принимаются. Изделия с уровнем  $R < R_1$  бракуются.

Числа  $R_1$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  определяют точки  $a$ ,  $\beta$  реальной оперативной характеристики, что позволяет выбрать план контроля и объем выборки  $n$  при испытании. При этом объем выборки  $n$  является единственным ограничением, не позволяющим произвольно уменьшать риски  $a$  и  $\beta$  и тем самым сближать приемочный  $R_0$  и браковочный  $R_1$  уровни.

Размещение интервала  $[R_1, R_0]$  относительно уровня надежности  $R_{mp}$  при  $a = \beta$  должно выбираться с учетом ущербов, наносимых поставщику и заказчику. Наиболее приемлемым является случай, когда ущерб заказчика и поставщика соизмеримы ( $a \approx \beta$ ), а интервал  $[R_1, R_0]$  размещается примерно симметрично относительно уровня надежности  $R_{mp}$ , т.е.  $L(R_{mp}) \approx 0,5$ .

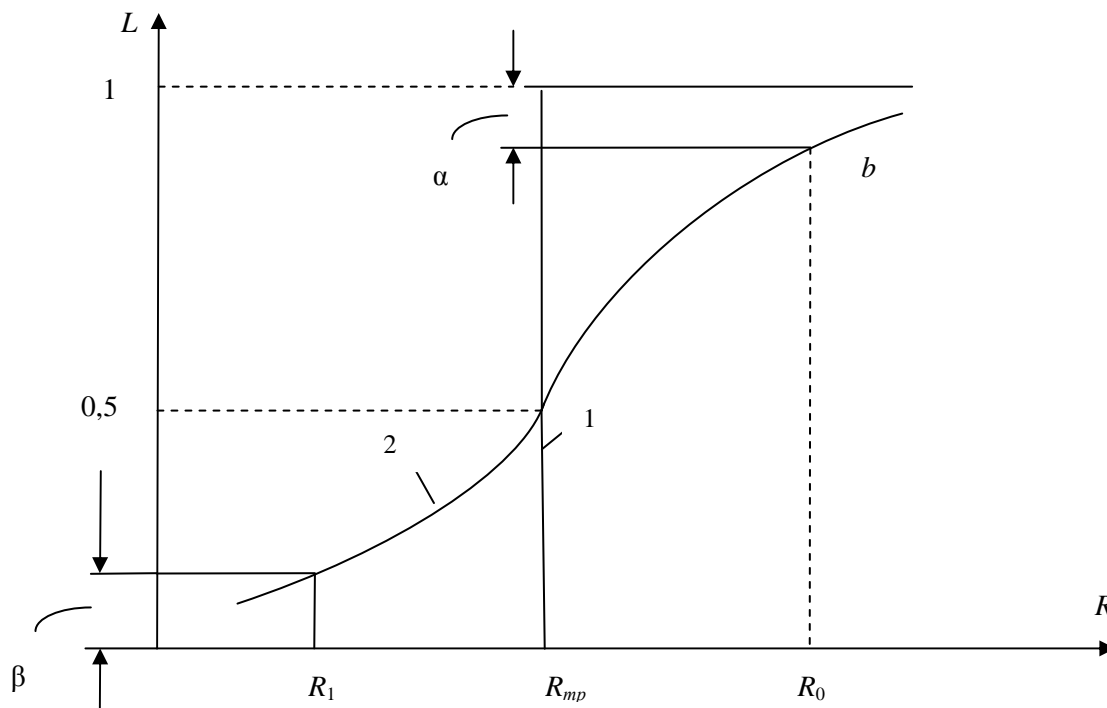


Рис 7.4. Оперативные характеристики плана контроля надежности:  
1 – идеальная; 2 – реальная

Полученные после испытания величины показателей надежности  $\hat{R}_0$  и  $\hat{R}_1$ , как правило, отличаются от запланированных. Значения вероятностей  $a$  и  $\beta$  при планировании испытания на надежность выбираются заранее с расчетом на наихудший результат, что соответствует условиям:

$$\hat{\alpha} \leq \alpha; \hat{\beta} \leq \beta.$$

В процессе разработки РЭС контроль надежности проводится как минимум один раз на приемочных испытаниях, по возможности используется также статистика предварительных и других испытаний. При серийном производстве РЭС контроль надежности обычно предусматривается в составе периодических испытаний. Контроль надежности высоконадежных мелкосерийных изделий целесообразно проводить при типовых испытаниях в случаях изменения конструкции, технологии или внедрения новых



комплектующих. Основанием для проведения подобного контроля надежности могут служить сведения о ее недостаточном уровне, полученные по результатам каких-либо испытаний или эксплуатации данного типа РЭС.

Контроль сложных по конструкции РЭС с широким применением резервирования может быть включен в состав прямо-сдаточных испытаний, поскольку большой объем получаемой статистики и использование расчетно-аналитических методов для контроля показателей надежности позволяют существенно сократить время и затраты на испытания.

### **7.9. Одноступенчатый контроль показателей надежности типа вероятности**

Рассмотрим контроль показателей надежности для наиболее распространенных случаев типа вероятности. Одновременно будем полагать, что наработка между отказами РЭС имеет экспоненциальное распределение, а продолжительность испытания ограничивается предельным временем (наработкой) или вероятностью безотказной работы.

Для выбора плана контроля абсолютные значения уровней надежности  $R_0 = T_0$  и  $R_1 = T_1$  несущественны. План контроля определяется лишь их отношением  $T_0/T_1$  и рисками  $\alpha$  и  $\beta$ . Кроме того, с целью упрощения процесса испытания приемку (браковку) целесообразно проводить не по уровню показателя надежности, а по функционально связанному с ним числу отказов.

В процессе контроля наработки на отказ фиксируется суммарное по всем  $N$  контролируемым образцам РЭС число отказов  $r$ , а также суммарная наработка

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N t_{Hi},$$

где  $t_{Hi}$  – наработка  $i$ -того изделия.

План контроля включает в себя браковочное число отказов  $r_{\text{бр}}$  и предельную суммарную наработку  $t_{\text{max}}$ . Контроль прекращается, как только будет достигнуто одно из указанных значений.

При условии  $r = r_{\text{бр}}$  и  $t_y < t_{\text{max}}$  результаты испытаний на надежность считаются неудовлетворительными (изделия бракуются). Если  $t_{\Sigma} = t_{\text{max}}$ , а  $r < r_{\text{бр}}$ , изделия принимаются.

План испытаний для показателей надежности типа наработки при одноступенчатом контроле выбирается с учетом данных табл. 7.6.

Таблица 7.6

**Характеристики планов испытаний для показателей надежности типа наработки при одноступенчатом контроле**

Исходные данные $T_0 < T_1$ , для $\beta$ , равного				План контроля		$t_k/T_0$
0,05	0,10	0,20	0,30	$ч_{бр}$	$t_{max}/T_0$	
$a = 0,05$						
58,820	45,450	31,250	23,250	1	0,052	0,04898
13,330	10,990	8,403	6,850	2	0,356	0,33850
7,692	6,493	5,235	4,425	3	0,817	0,803
5,682	4,878	4,032	3,484	4	1,366	1,344
4,651	4,065	3,413	2,994	5	1,970	1,944
4,032	3,546	3,030	2,681	6	2,613	2,587
3,646	3,205	2,762	2,469	7	3,285	3,252
3,350	2,958	2,570	2,315	8	3,981	3,945
3,077	2,770	2,427	2,193	9	4,695	4,652
2,898	2,618	2,309	2,102	10	5,425	5,376
2,747	2,500	2,217	2,020	11	6,169	6,120
2,631	2,398	2,137	1,957	12	6,924	6,876
2,531	2,315	2,070	1,901	13	7,689	7,635
2,445	2,242	2,012	1,855	14	8,464	8,413
2,369	2,178	1,961	1,815	15	9,246	9,190
2,096	1,961	1,779	1,658	20	13,200	13,134
1,942	1,815	1,669	1,567	25	17,300	17,230
1,835	1,721	1,597	1,515	30	21,500	21,414
$a = 0,10$						
28,570	21,740	15,380	11,360	1	0,105	0,095
8,928	7,299	5,650	4,587	2	0,532	0,503
5,714	4,831	3,891	3,278	3	1,102	1,069
4,444	3,831	3,164	2,732	4	1,745	1,694
3,769	3,289	2,762	2,421	5	2,432	2,374
3,333	2,941	2,519	2,222	6	3,152	3,082
3,039	2,703	2,331	2,083	7	3,895	3,813
2,825	2,525	2,198	1,980	8	4,656	4,568
2,659	2,392	2,096	1,897	9	5,432	5,340
2,525	2,283	2,012	1,831	10	6,221	6,121
2,415	2,193	1,945	1,776	11	7,020	6,915
2,325	2,118	1,887	1,730	12	7,829	7,711
2,247	2,057	1,838	1,692	13	8,646	8,524
1,915	1,792	1,626	1,515	20	14,520	14,346
1,792	1,672	1,538	1,445	25	18,840	18,651
1,706	1,602	1,486	1,408	30	23,230	23,020

Таблица составлена для заданных значений  $a$  и  $\beta$  и таких отношений  $T_0/T_1$ , когда числа отказов  $r_{\bar{o}p}$  принимают дискретные и целые значения (1, 2, 3, ...). В таблице приведены также значения средней продолжительности контрольной процедуры  $\bar{t}_K$  и суммарной наработки  $t_{\max}$ , отнесенной к средней наработке на отказ  $T_0$ . Отношения  $T_0/T_1$  вычислены для каждой пары значений  $a$  и  $\beta$  и 18-и значений  $r_{\bar{o}p}$  по формуле

$$T_0/T_1 = \chi_{1-\beta, 2r_{\bar{o}p}}^2 / \chi_{\alpha, 2r_{\bar{o}p}}^2, \quad (7.7)$$

где  $\chi_{1-\beta, 2r_{\bar{o}p}}^2 / \chi_{\alpha, 2r_{\bar{o}p}}^2$  – табличные квантили уровней;  $1-\beta$ ,  $\alpha$  - и  $\chi^2$ -распределения с  $2r_{\bar{o}p}$  степенями свободы.

Величина  $t_{\max}/T_0$  определяется как

$$t_{\max}/T_0 = 1/2 \chi_{\alpha, 2r_{\bar{o}p}}^2. \quad (7.8)$$

Оперативная характеристика любого из приведенных в таблице планов может быть построена с учетом зависимости

$$L(T) = \sum_{r=0}^{r_{\bar{o}p}-1} \frac{(t_{\max}/T)^r e^{-t_{\max}/T}}{r!}. \quad (7.9)$$

Продолжительность испытания РЭС можно изменять в широких пределах за счет пропорционального изменения числа контролируемых изделий с единственным условием: обеспечить требуемую суммарную наработку.

### 7.10. Одноступенчатый контроль показателей надежности типа вероятности

Подобный контроль предусматривает организацию  $N$  независимых опытов, в каждом из которых фиксируется факт наработки времени  $t$ , что дает возможность оценить вероятность  $P(t)$ . Допускается и другой вариант (контроль  $K$ ) – в выбранный момент времени определяется работоспособность изделия. После  $N$ -ного опыта изделия принимаются, если суммарное число отказов не более заранее вычисленного оценочного норматива  $R_{\bar{o}p}$ , в противном случае – бракуются.

Как известно из теории вероятностей, испытания могут проводиться как на одном, так и на нескольких (до  $N$  включительно) образцах изделий, при условии, что независимость опытов будет обеспечена либо за счет полного восстановления отказавшего изделия к началу очередного опыта,

либо за счет разнесения опытов по времени или по образцам. Таким образом, план контроля показателей надежности типа вероятности основан на проверке двух чисел –  $N$  и  $r_{\bar{o}p}$ .

План контроля выбирается по заданным величинам  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  с помощью табл. 7.7. Значения  $N$  и  $r_{\bar{o}p}$ , приведенные в таблице, вычислены с помощью системы уравнений

$$\sum_{i=1}^{r_{\bar{o}p}-1} C_N^i P_0^{N-i} (1-P_0)^i = 1-\alpha; \quad (7.10)$$

$$\sum_{i=1}^{r_{\bar{o}p}-1} C_N^i P_0^{N-i} (1-P_0)^i = \beta. \quad (7.11)$$

Независимость опытов при контроле показателей надежности можно обеспечить по-разному. При экспоненциальном распределении отказов ( $\lambda = \text{const}$ )  $N$  циклов работы длительностью  $t$  можно планировать с любым числом образцов от 1 до  $N$ . Если же закон распределения отличается от экспоненциального или он неизвестен, то каждый цикл необходимо проводить с отдельным образцом, т.е. для испытания потребуется  $N$  образцов.

Таблица 7.7

**Количество испытаний  $N$  при одноступенчатом контроле**

$P_0$	$\alpha = \beta = 0,1$				$\alpha = \beta = 0,2$			
	$(1-P_1)/(1-P_0)=2,0$	2,5	3,0	4,0	2,0	2,5	3,0	4,0
	$Ч_{\bar{o}p} = 14$	8	6	4	6	4	3	2
0,999	9470	4655	3150	1745	3905	2295	1535	825
0,998	3735	2328	1575	872	1953	1148	768	413
0,997	3158	1552	1050	582	1302	765	512	275
0,996	1369	1164	788	436	977	574	384	207
0,995	1895	931	630	349	781	459	307	165
0,994	1578	776	525	291	651	382	256	138
0,993	1353	665	450	249	558	328	220	118
0,992	1884	582	394	218	489	287	192	103
0,991	1052	518	350	194	434	255	171	92
0,990	947	466	315	175	391	230	154	83
0,980	473	233	158	87	196	115	77	42
0,970	315	155	105	58	131	77	52	28
0,960	237	116	79	44	98	58	39	21
0,950	189	93	63	35	78	46	31	17
0,940	158	78	53	29	66	38	26	14
0,930	135	67	45	25	56	33	22	12
0,920	118	58	40	22	49	29	20	11
0,910	106	52	35	20	44	26	17	10
0,900	95	47	32	18	37	23	16	9

**Пример.** Проводятся испытания комплектующих изделий электронной техники, для которых  $\alpha = \beta = 0,2$ . Уровни вероятности безотказной работы заданы значениями:  $P = 0,96$ ;  $P = 0,92$ . Время испытания  $T = 15$  ч. Выбрать план контроля, т.е. определить  $N$  и  $r_{бр}$ .

Решение

По табл. 7.7 для заданных  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  находим

$$\frac{1 - P_1}{1 - P_0} = \frac{1 - 0,92}{1 - 0,96} = 2.$$

При  $P = 0,96$ ,  $\alpha = \beta = 0,2$   $N = 98$ ,  $r_{бр} = 6$ .

Планы испытаний на надежность записываются сочетанием трех символов  $[NVT]$ ,  $[NVr]$ ,  $[NRT]$  и т.д. Например, сочетание символов  $[NVT]$  означает, что испытанию подвергается  $N$  устройств, отказавшие во время испытания устройства заменяются исправным  $R$ , после наработки  $T$  часов испытание прекращается. В табл. 7.8 приведены факторы планов контроля и их условные обозначения.

Таблица 7.8

**Факторы планов контроля и их условные обозначения**

Фактор, характеризующий планы испытаний	Условные обозначения	
Число испытаний изделий	Одно	/
	Более одного	$N$
Возможность восстановления (замены) изделия при испытании	Не восстанавливаются и не заменяются	$V$
	Не восстанавливаются и не заменяются	$R$
	Восстанавливаются	$M$
Правило прекращения испытания	Наработка	$T$
	Число отказов	$R$
	Наработка или число отказов	$r, T$
Порядок поступления изделий при испытании	Одновременно	[ ]
	Не одновременно	( )
Режим контроля функционирования изделия при испытании	Непрерывно	[ ] или ( )
	Периодически	[[ ]] или (( ))
	Только перед началом и по окончании испытания	{ }

### 7.11. Метод последовательных испытаний РЭС на надежность

Метод последовательных испытаний на надежность (последовательный анализ А. Вальда) характерен тем, что число и продолжительность испытаний изделий на надежность заранее не устанавливаются. Как показано в [7], при использовании метода последовательных испытаний в среднем требуется примерно в два – три раза меньший объем выборки по сравнению с процедурами, основанными на выборке фиксированного объема.

Последовательные испытания на надежность РЭС включают проверку двух гипотез:

- начальной гипотезы  $H_0$ , заключающейся в том, что надежность принимаемой партии изделий соответствует техническим условиям;
- конкурирующей гипотезы  $H_1$ , заключающейся в том, что надежность принимаемой партии изделий не соответствует техническим условиям.

Испытания должны продолжаться до тех пор, пока не будет принята одна из этих гипотез. Для ряда практических задач иногда оказывается целесообразным усечение последовательных испытаний, несмотря на некоторое увеличение рисков поставщика и заказчика.

Суть последовательных испытаний на надежность заключается в следующем. До начала испытания задаются вероятности ошибок первого ( $\alpha$ ) и второго ( $\beta$ ) рода. После каждого последовательного наблюдения вычисляется неравенство

$$\frac{\beta}{1-\alpha} \leq \frac{P_{0r}}{P_{1r}} \leq \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad (7.12)$$

где  $\frac{\beta}{1-\alpha}$ ,  $\frac{1-\beta}{\alpha}$  – пороговые значения последовательной процедуры;

$$\begin{aligned} P_{0r} &= f(x_i, \theta_0/H_0) \dots f(x_r, \theta_0/H_0); \\ P_{1r} &= f(x_i, \theta_1/H_1) \dots f(x_r, \theta_1/H_1). \end{aligned} \quad (7.13)$$

Уравнения (7.13) определяют функции совместных условных плотностей вероятностей непрерывной случайной величины  $X$ ;  $x_i (i = 1, T)$  – реализация случайной величины  $X$ , полученная при  $i$ -том измерении;  $x = \theta_0$ ,  $x = \theta_1$  – математические ожидания случайной величины  $X$  при проверках гипотез  $H_0$  и  $H_1$ .

Если случайная величина  $X$  дискретна, то вместо отношения  $P_{0r}/P_{1r}$  условных плотностей вероятностей в неравенстве (7.11) используется отношение соответствующих вероятностей  $P_0/P_1$ .

Партия изделий принимается, когда

$$\frac{P_{0T}}{P_{1T}} \geq \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad (7.14)$$

а при условии

$$\frac{P_{0T}}{P_{1T}} \leq \frac{1-\beta}{\alpha} \quad (7.15)$$

бракуется;

$$f(x_r, \theta_0/H_0).$$

На рис. 7.5 показаны функции  $f(x_i, \theta_0/H_0)$  и  $f(x_i, \theta_1/H_1)$  для нормального закона распределения случайной величины  $X$  и области ошибок  $\alpha$  и  $\beta$ .

Последовательные испытания на надежность типа наработки и вероятности применимы для любых распределений случайных величин (экспоненциального, Пуассона, Вейбулла, нормального и др.)

Рассмотрим применение метода последовательных испытаний на примерах оценки надежности РЭС с простейшим пуассоновским и нормальным потоками отказов.

Поток отказов простейший.

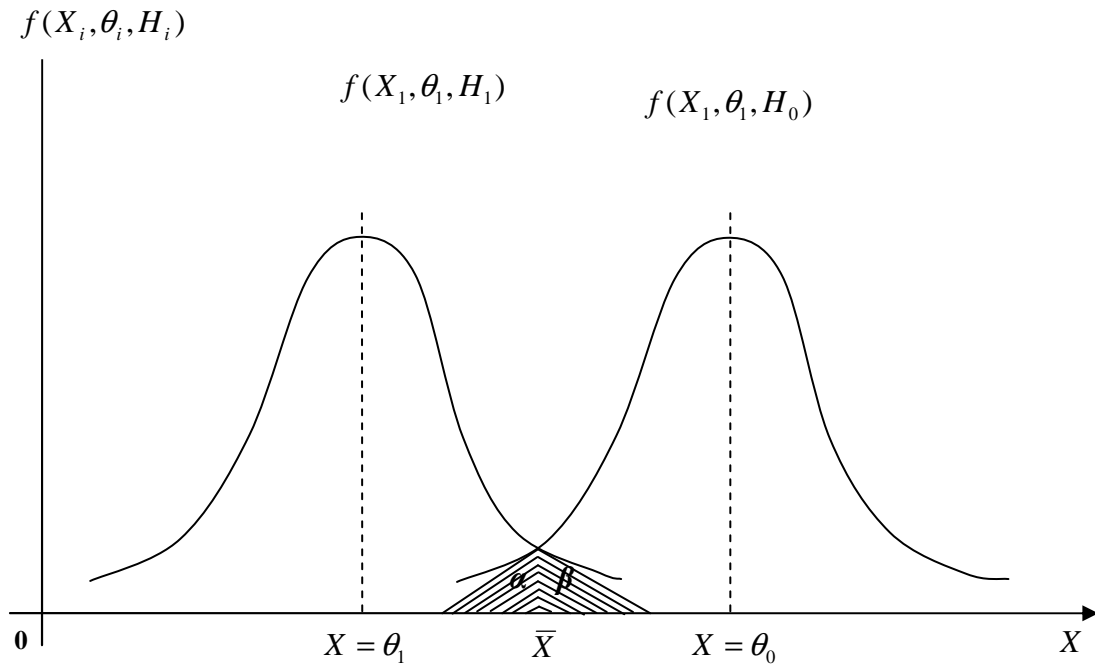


Рис. 7.5. Функции плотностей вероятностей случайной величины  $X$  и области ошибок  $\alpha$  и  $\beta$

Обозначим через  $T_0$  и  $T_1$  заданные уровни средних наработок до отказа. Тогда в соответствии с законом Пуассона

$$P_0 = \frac{1}{r!} \left( \frac{t_\Sigma}{T_0} \right)^r e^{-\frac{t_\Sigma}{T_0}} ; \tag{7.16}$$

$$P_1 = \frac{1}{r!} \left( \frac{t_\Sigma}{T_1} \right)^r e^{-\frac{t_\Sigma}{T_1}} ,$$

где  $r$  – число отказов РЭС;  $t_\Sigma$  – суммарное время наработки  $r$  отказавших устройств.

Отношение вероятностей (7.15) и (7.16)

$$\frac{P_0}{P_1} = \left( \frac{T_1}{T_0} \right)^r e^{t_{\Sigma} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)}. \quad (7.17)$$

Правую часть (7.17) подставим в неравенство (7.12) и получим

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < \left( \frac{T_1}{T_0} \right)^r e^{t_{\Sigma} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)} < \frac{1-\beta}{\alpha}. \quad (7.18)$$

Прологарифмируем последнее неравенство и после некоторых преобразований будем иметь:

$$\left( \frac{1}{z} \ln \frac{\beta}{1-\alpha} - \frac{r}{z} \ln \frac{T_1}{T_0} \right) < \frac{t_{\Sigma}}{T_0} < \left( \frac{1}{z} \ln \frac{1-\beta}{\alpha} - \frac{r}{z} \ln \frac{T_1}{T_0} \right), \quad (7.19)$$

где  $z = \frac{T_0 - T_1}{T_1}$ .

Введем следующие обозначения:

$$A = \frac{1}{z} \ln \frac{\beta}{1-\alpha} = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{\beta}{1-\alpha};$$

$$B = \frac{1}{z} \ln \frac{1-\beta}{\alpha} = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{1-\beta}{\alpha};$$

$$K = \frac{1}{z} \ln \frac{T_1}{T_0} = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_1}{T_0}.$$

Тогда с учетом принятых обозначений и граничных условий можно записать, что

$$(A - Kr) \leq \frac{t_{\Sigma}}{T_0} \leq (B - Kr). \quad (7.20)$$

Левая и правая части (7.20) представляют собой уравнения двух параллельных прямых, тангенс угла наклона которых равен  $K$ .

**Пример.** В НТД на испытание усилителя промежуточной частоты (УПЧ) заданы: уровни средней наработки до отказа  $T_0 = 1000$  ч;  $T_1 = 800$  ч; ошибка первого рода  $\alpha = 0,05$ ; ошибка второго рода  $\beta = 0,08$ .

Используя метод последовательных испытаний, определим план контроля в виде графика. Для этого вычислим коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $K$  при заданных условиях:

$$A = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{\beta}{1-\alpha} = \frac{800}{1000 - 800} \ln \left( \frac{0,08}{1 - 0,05} \right) = -9,86;$$



$$B = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{1 - \beta}{\alpha} = \frac{800}{1000 - 800} \ln \left( \frac{1 - 0,08}{0,05} \right) = 11,6;$$

$$K = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \ln \frac{T_1}{T_0} = 4(-0,22) = -0,88.$$

Полученные численные значения подставим в выражение (7.20):

$$(-9,86 + 0,88r) \leq \frac{t_{\Sigma}}{T_0} \leq (11,6 + 0,88r). \quad (7.21)$$

На основании (7.21) можно построить план-график испытания ИМС, приведенный на рис. 7.6.

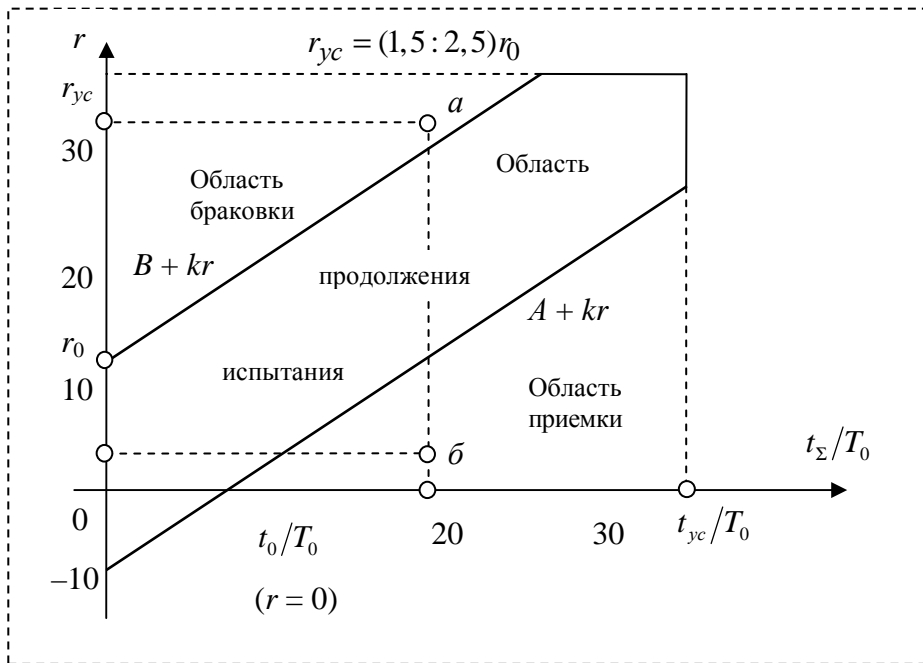


Рис. 7.6. План-график испытания ИМС на надежность

В процессе испытания фиксируются две величины: число отказов  $r$  и относительная величина наработки  $t_{\Sigma}/T_0$ . При попадании в область приемки (точка  $b$ ) или область браковки (точка  $a$ ) испытания прекращаются. Попадание в область между прямыми  $B + kr$  и  $A + kr$  является условием продолжения испытания до принятия одной из гипотез –  $H_0$  или  $H_1$ .

В процессе испытания РЭС на случай многократных попаданий на граничные значения прямых  $A + kr$  и  $B + kr$ , а также в область продолжения испытания принимается решение о прекращении испытания. В этом случае рекомендуется пользоваться усеченной программой испытаний при условии, что  $r_y = (1,5 - 2,5)r_0$ .

Поток отказов имеет нормальное распределение.

В процессе испытания РЭС получены реализации  $x_1, x_2, \dots, x_m$  параметра  $X$ , совместные плотности вероятности которых равны

$$P_{0m} = \prod_{i=1}^m f(x_i/H_0) = \frac{1}{\sigma(\sqrt{2\pi})^m} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (x_i - \theta_0)^2\right]; \quad (7.22)$$

$$P_{1m} = \prod_{i=1}^m f(x_i/H_1) = \frac{1}{\sigma(\sqrt{2\pi})^m} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (x_i - \theta_1)^2\right], \quad (7.23)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение величины  $X$ ;  $x = \theta_0; x = \theta_1$  – математические ожидания случайной величины  $X$ ;  $m$  – число измерений.

При известных до начала испытаний величинах  $\alpha, \beta, \theta_0, \theta_1$  и  $\sigma$  и нормальном законе распределения отказов РЭС последовательная процедура заключается в проверке неравенства

$$\left(\frac{\sigma^2}{\theta_0 - \theta_1} \ln \frac{\beta}{1 - \alpha} + m \frac{\theta_0 + \theta_1}{2}\right) < \sum_{i=1}^m x_i < \left(\frac{\sigma^2}{\theta_0 - \theta_1} \ln \frac{1 - \beta}{\alpha} + m \frac{\theta_0 + \theta_1}{2}\right). \quad (7.24)$$

Обозначим

$$C = \frac{\sigma^2}{\theta_0 - \theta_1} \ln \frac{\beta}{1 - \alpha};$$

$$D = \frac{\sigma^2}{\theta_0 - \theta_1} \ln \frac{1 - \beta}{\alpha}; \quad K' = \frac{\theta_0 + \theta_1}{2}.$$

С учетом введенных обозначений и граничных условий неравенство (7.24) запишем в таком виде:

$$(C + K' m) \leq \sum_{i=1}^m x_i \leq (D + K' m). \quad (7.25)$$

Партия изделий считается соответствующей требованиям ТУ по надежности в случае, если

$$a_m = \sum_{i=1}^m x_i \leq (C + K' m). \quad (7.26)$$

Наоборот, при

$$r_m = \sum_{i=1}^m x_i \geq (D + K' m) \quad (7.27)$$

партия изделий отклоняется как не прошедшая испытаний на надежность. В теории последовательного анализа число  $a_m$  называется приемочным, а  $r_m$  – браковочным числом.

**Пример.** Потребляемый однотипными микросхемами ток задан двумя уровнями:

$$I_1 = \theta_0 = 23 \text{ мА}; \quad I_2 = \theta_1 = 17 \text{ мА}.$$

Кроме того, известно, что  $\alpha = 0,01$ ,  $\beta = 0,03$ ,  $\sigma = 3 \text{ мА}$ .

Наработка микросхем до отказа подчинена нормальному закону распределения и для конкретной микросхемы равна  $x_i = t_i$ . Необходимо составить план испытаний микросхем в виде предварительной таблицы.

По формулам (7.26) и (7.27) найдем приемочное  $a_m$  и браковочное  $r_m$  числа:

$$a_m = \sum_{i=1}^m x_i \leq (-5,3 + 20m);$$

$$r_m = \sum_{i=1}^m x_i \geq (6,9 + 20m).$$

Значения наработок микросхем до отказа и  $\sum_{i=1}^m t_i$ , а также результаты расчетов приемочных  $a_m$  и браковочных  $r_m$  чисел при целых  $m$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) сведены в табл. 7.9.

Таблица 7.9

План последовательного испытания РЭС

План испытания микросхем типа _____ объем выборки _____, дата _____					
$m$	$a_m$	$t_i = x_i$	$\sum_{i=1}^m t_i$	$r_m$	Результат испытания
1.	14,7	18,7	18,7	26,9	Партия принята
2.	34,7	18,0	36,7	46,9	
3.	54,7	20,0	56,7	66,9 86,9	
4.	74,7	19,8	76,5	106,9 126,9	
5.	94,7	19,0	95,5		
6.	114,7	15,0	110,5		
7.	134,7	17,5	128,0	146,9	
—	—	—	—	—	
—	—	—	—	—	
—	—	—	—	—	
Испытание провел: Ф.И.О. _____					
Подпись _____					

Из табл. 7.9 следует, что после шестого измерения партию микросхем можно принять, так как выполняется условие неравенства

$$\sum_{i=1}^6 t_1 = 110,5 < a_m = 114,7.$$

Одновременно не подтверждается условие браковки партии микросхем, так как

$$\sum_{i=1}^6 t_1 = 110,5 < r_m = 126,9.$$

Характеристики планов последовательных испытаний при использовании показателей надежности типа наработки  $(T_0, T_1)$  и типа вероятности  $(P_0, P_1)$  для наиболее распространенного экспоненциального распределения отказов и циклических испытаний РЭС приведены в [41]. При этом значения величин  $B = r_0, K$  и  $t_0/T_0$  (оценка показателей типа наработки) определяются по табл. 7.10 как функции заданных значений  $\alpha, \beta$  и отношений  $t_0/T_0$ , вычисленных по формулам

$$\frac{t_0}{T_0} = -\frac{\ln\left[\frac{\beta}{1-\alpha}\right]}{\frac{T_0}{T_1} - 1}; \quad (7.28)$$

$$B = r_0 = -\frac{\ln\left[\frac{\beta}{1-\alpha}\right]}{\ln\left(\frac{T_0}{T_1}\right)}; \quad (7.29)$$

$$K = -\frac{\frac{T_0}{T_1} - 1}{\ln\left(\frac{T_0}{T_1}\right)}. \quad (7.30)$$

Там же приведены нижние оценки средней продолжительности испытаний  $\bar{t}/T_0$  для восстанавливаемых в процессе испытаний изделий, равные при  $T = T_0$

$$\frac{\bar{t}}{T_0} = \frac{(1-\alpha)\ln[(1-\alpha)/\beta] - \alpha\ln[(1-\beta)/\alpha]}{T_0/T_1 - 1 - \ln(T_0/T_1)}. \quad (7.31)$$

Последовательная процедура с непрерывным временем испытаний позволяет сократить их среднюю продолжительность. Область приемки при этом не меняется, а область браковки смещается вниз до координаты

$$r_0' = B'(r_0' < r_0).$$

Численные значения  $r_0'$  определяются по данным табл. 7.11.

Следует заметить, что составление плана испытаний на надежность с использованием последовательных процедур требует тщательных и всесторонних исследований, связанных с учетом специфики технологии производства РЭС, с оценкой законов распределения и пределов изменений их контролируемых параметров.

Необоснованное изменение допусков на контролируемые параметры может привести к значительному увеличению объема выборки и затрат на процесс испытаний.

Таблица 7.10

**Характеристики планов последовательных испытаний типа наработки (экспоненциальное распределение)**

$T_0/T_1$	План испытания			$t/T_0$
	$K$	$r_0$	$t_0/T_0$	
$\alpha = \beta = 0,1$				
2,00	1,44	3,16	2,19	5,69
1,79	1,36	3,77	2,77	8,42
1,60	1,28	4,66	3,65	13,4
1,50	1,23	5,42	4,39	18,6
$\alpha = \beta = 0,2$				
2,00	1,44	2,00	1,39	2,71
1,77	1,35	2,43	1,80	4,18
1,61	1,28	2,93	2,29	6,31
1,50	1,23	3,42	2,77	8,80
$\alpha = \beta = 0,3$				
2,00	1,44	1,22	0,847	1,10
1,72	1,33	1,56	1,170	1,89
1,62	1,29	1,75	1,364	2,46
1,50	1,23	2,09	1,69	3,58

Таблица 7.11

**Численные значения  $r_0'$**

$T_0/T_1$	$r_0$ при $\alpha$ и $\beta$ , равных		
	0,1	0,2	0,3
2,00	3,06	1,67	0,889
1,80	3,41	2,02	1,07
1,60	4,34	2,62	1,48
1,50	5,08	3,08	1,76

## Глава 8. СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОДУКЦИИ, УСЛУГ

### 8.1. Обязательная и добровольная сертификация

С 1993 года в соответствии с Законом Республики Беларусь «О защите прав потребителей» в республике ведутся работы по сертификации продукции и услуг, возглавляемые республиканским органом по сертификации – Госстандартом Республики Беларусь. Сертификация проводится для обеспечения соответствия продукции и услуг конкретному нормативному документу.

**Обеспечение соответствия** – процедура, результатом которой является заявление, дающее уверенность в том, что продукция, процесс или услуга соответствуют заданным требованиям.

**Сертификация** – процедура, посредством которой третья сторона дает письменную гарантию, что продукция, процесс или услуга соответствуют заданным требованиям.

**Третья сторона** – лицо или орган, признаваемые независимыми от участвующих сторон в рассматриваемом вопросе.

По результатам сертификации выдается сертификат соответствия. Сертификат соответствия – документ, выданный в соответствии с правилами системы сертификации, указывающий на обеспечиваемость необходимой уверенности в том, что данная продукция, процесс или услуга соответствует конкретному нормативному документу.

Цели сертификации:

- 1) защита рынка от небезопасной продукции и услуг;
- 2) обеспечение технической совместимости продукции;
- 3) повышение престижа предприятия в области производства продукции и оказания услуг.

В соответствии с целями сертификация может быть обязательной или добровольной.

Обязательная сертификация вводится законодательно по постановлению правительства или другой организации, правомочной в области сертификации (в Республике Беларусь такое право предоставлено Госстандарту Республики Беларусь). Обязательная сертификация может вводиться по показателям безопасности, охраны окружающей среды или другим.

Сертификация производится через стандарты либо по номенклатуре параметров, обязательных при сертификации. Продукция, на которую в нормативном документе содержатся требования безопасности, подлежит обязательной сертификации с последующей маркировкой этого товара зна-

ком соответствия. Реализация таких товаров без сертификата в Беларуси запрещена. Это относится как к производимым, так и к импортируемым в Беларусь товарам.

Для показателей, по которым законодательством в Республике Беларусь проведение обязательной сертификации не предусмотрено, проводится добровольная сертификация.

В Беларуси действует национальная система сертификации (НСС), управляемая Госстандартом, кроме нее могут быть созданы добровольные подсистемы сертификации.

Обязательную сертификацию проводят органы по сертификации, аккредитованные в НСС, испытания продукции – лаборатории, аккредитованные на техническую компетентность и независимость.

**Аккредитация** – это процедура, посредством которой авторитетный орган официально признает правомочность лица или органа выполнять конкретные работы.

Продукция, подлежащая обязательной сертификации на территории Беларуси, при ввозе в республику должна сопровождаться сертификатом и (или) знаком соответствия. Сертификат соответствия предоставляется таможенным организациям вместе с таможенной декларацией и является обязательным документом вместе с документом на ввоз продукции в Республику Беларусь. Поэтому в контрактах и договорах на поставку продукции, подлежащей обязательной сертификации, должно быть предусмотрено наличие сертификата и (или) знака соответствия на импортируемую продукцию.

## **8.2. Национальная система сертификации**

**Национальная система сертификации (НСС РБ)** – система сертификации, установленная республиканским органом по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандартом) и действующая на территории Беларуси.

Цели НСС РБ:

- 1) защита потребителей от использования продукции, работ и услуг, представляющих опасность для жизни, здоровья, имущества граждан, и охрана окружающей среды;
- 2) устранение технических барьеров в международной торговле и повышение качества и конкурентоспособности продукции, работ и услуг;
- 3) защита отечественного рынка от небезопасной и недоброкачественной продукции, поступившей по импорту.

Для выполнения целевых функций создана структура НСС РБ (рис. 8.1).

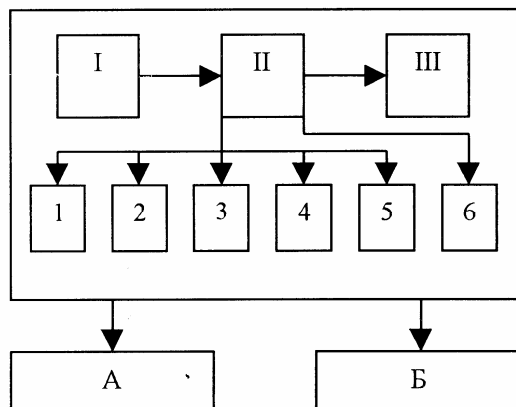


Рис. 8.1. Структура системы:

I – совет системы (п. 5.6. СТБ 5.1.01-96); II – республиканский орган по сертификации (п. 4.2. СТБ 5.1.01-96); III – апелляционный совет системы (п. 5.9. СТБ 5.1.01-96); 1 – аккредитованные органы по сертификации однородной продукции и услуг (СТБ 5.1.02-96); 2 – аккредитованные органы по сертификации систем качества (СТБ 5.1.03-96); 3 – аккредитованные органы по сертификации персонала (ГОСТ 30488-97); 4 – аккредитованный центр по подготовке экспертов-аудиторов по качеству (СТБ 5.1.01-96); 5 – штат экспертов-аудиторов по качеству (СТБ 5.1.01-96); 6 – подсистемы сертификации по видам продукции, услуг, отдельным требованиям (п. 4.7. СТБ 5.1.01-96); А – аккредитованные испытательные лаборатории (СТБ 941.0-93); Б – изготовители (поставщики) продукции

В рамках НСС осуществляются следующие виды деятельности:

- 1) сертификация продукции, услуг, систем качества и персонала;
- 2) аккредитация органов по сертификации продукции, услуг, систем качества и персонала;
- 3) аккредитация центра по подготовке экспертов-аудиторов по качеству и аттестация экспертов-аудиторов по качеству;
- 4) ведение реестра НСС.

В составе республиканского органа действует совет системы, в который входят руководители и специалисты Госстандарта, а на заседания могут приглашаться руководители органов по сертификации, представители министерств, ведомств, контрольных служб. Возглавляет совет Председатель Госстандарта. Основная задача совета – определение политики в области сертификации и координация работ по вопросам сертификации и аккредитации.

В апелляционный совет входят руководители центральных органов по сертификации, представители республиканского органа, а на заседания могут приглашаться представители министерств, ведомств и др. Заседания



апелляционного совета проводятся по необходимости. Возглавляет апелляционный совет начальник Управления по сертификации.

На республиканский орган по сертификации возложены функции:

- 1) определения политики по вопросам сертификации в республике;
- 2) подготовки законодательных документов по вопросам сертификации и аккредитации;
- 3) разработки организационно-методических документов системы;
- 4) представления республики в международных организациях по сертификации и аккредитации;
- 5) заключения соглашений по взаимному признанию результатов работ по сертификации;
- 6) аккредитации органов по сертификации и инспекционного контроля за аккредитованными органами;
- 7) аттестации экспертов-аудиторов по качеству;
- 8) проведения работ по сертификации в случае отсутствия аккредитованного органа;
- 9) утверждения показателей, проверяемых при обязательной сертификации;
- 10) ведения реестра НСС (в автоматизированном режиме);
- 11) принятия решения о создании подсистем сертификации по видам продукции, услуг, отдельным требованиям.

Республиканский орган обладает правами:

- 1) инспекционного контроля органов сертификации;
- 2) приостановки действия сертификата соответствия;
- 3) отмены решения органа по сертификации;
- 4) приостановки деятельности органа по сертификации.

Орган по сертификации продукции, услуг, систем качества и персонала выполняет основные функции:

- 1) разрабатывает организационно-методические документы;
- 2) проводит работы по сертификации;
- 3) проводит инспекционный контроль за сертифицированными продукцией, услугами, системами качества;
- 4) регистрирует и выдает сертификаты соответствия на продукцию, услуги, системы качества и сертификаты компетентности для персонала;
- 5) взаимодействует с республиканским органом, другими органами по сертификации, аккредитованными испытательными лабораториями, органами аккредитации этих лабораторий, организациями, осуществляющими контроль и надзор за реализацией продукции;
- 6) разрабатывает программы обучения (утверждаемые Госстандартом), организует и проводит обучение и повышение квалификации.

### 8.3. Схемы сертификации и условия их применения

В НСС используются схемы сертификации, принятые в ИСО и дополненные заявлением о соответствии продукции изготовителя (поставщика). Эти схемы учитывают модульный подход к оценке соответствия, используемый в Европейском союзе.

В СТБ 5.1.01-96 приведены схемы в качестве справочного приложения, а в СТБ 5.1.04-95 – обязательные схемы (табл. 8.1), которые необходимо применять при обязательной сертификации.

Таблица 8.1

Схемы сертификации, используемые в НСС РБ

Номер схемы	Испытания	Проверка производства	Инспекционный контроль сертифицированной продукции
2	Испытания типа	–	–
3а	Испытания типа	Анализ состояния производства	Испытания образцов и (или) оценка состояния производства
5	Испытания типа	Сертификация системы качества	Испытания образцов, контроль за стабильностью функционирования системы качества
6а	Рассмотрение заявления о соответствии продукции изготовителя с прилагаемыми документами	Сертифицированная система качества	Контроль за стабильностью функционирования системы качества
7	Испытания партии	–	–
8	Испытания каждого изделия	–	–
9	Рассмотрение заявления о соответствии продукции изготовителя с прилагаемыми документами	–	–
	Рассмотрение заявления о соответствии продукции изготовителя с прилагаемыми документами	Анализ состояния производства	Испытания образцов, взятых у заявителей

**Схема 2** – для продукции, поставляемой по контракту малыми партиями в течение одного года.

**Схема 3а и 5** – для изделий серийного и массового производства.

**Схема 6а** – для изделий серийного и массового производства при наличии сертифицированной системы качества.

*Схема 7* – для партии продукции.

*Схема 8* – для изделий, представляющих большую опасность для жизни человека или для изделий, выход из строя которых может привести к катастрофе.

*Схема 9* – для изделий единичного производства и опытных образцов, а также малых партий продукции, приобретаемых целевым назначением для оснащения отечественных производственных или иных объектов, если представленная документация подтверждает безопасность изделия.

*Схема 9а* – для скоропортящихся пищевых продуктов, продовольственного сырья, плодов, овощей, ягод, грибов.

При обязательной сертификации орган сертификации назначает схему сертификации. При добровольной – заявитель предлагает схему сертификации.

В НСС проводится процедура признания сертификатов в рамках международных систем по документам, правилам и процедурам, установленным в данной системе.

#### **8.4. Порядок проведения работ по сертификации**

Сертификация включает последовательность процедур:

1. Подачу заявки на сертификат и представление материалов, прилагаемых к ней.
2. Анализ заявки на правильность заполнения и предоставленных документов на достаточность.
3. Принятие решения по заявке.
4. Анализ документации.
5. Идентификацию продукции и отбор образцов.
6. Испытания образцов продукции.
7. Анализ состояния производства.
8. Анализ полученных результатов.
9. Принятие решения о возможной выдаче сертификата.
10. Регистрацию и выдачу сертификата, а также заключение соглашения о сертификации серийной продукции.
11. Инспекционный контроль за сертифицированной продукцией.

Каждая процедура сертификации продукции должна быть документально оформлена. Все работы по сертификации оплачиваются заявителем и проводятся на основе договоров с обязательной калькуляцией и актами сдачи-приема работ.

Заявитель сам выбирает орган по сертификации, но при достаточно сложной продукции, для которой нет аккредитованного органа, Госстандарт назначает орган по сертификации.

Заявка на сертификацию рассматривается в течение двух недель.

В серийном производстве к заявке прилагаются:

- 1) нормативный документ на продукцию (кроме стандарта);
- 2) удостоверение государственной гигиенической регистрации (если подлежит таковой);
- 3) протоколы испытаний (при наличии);
- 4) дополнительная информация о продукции и производстве (пожаро-, электробезопасность, акты санитарно-эпидемиологической станции – СЭС и др.);
- 5) сертификат на систему качества (при наличии).

Для сертификации партии продукции прилагаются:

- 1) товарно-сопроводительные документы (накладная, удостоверение государственной гигиенической регистрации и др.);
- 2) документы о качестве;
- 3) копия таможенной декларации.

Если все документы в норме, заполняется решение по заявке, если документов не хватает – в письменном виде уведомляется заявитель. При выборе типовых представителей обязательно указывают в решении конкретные типы продукции, на которые распространяется типовой представитель.

Анализ нормативной документации включает проверку:

- 1) соответствия рассматриваемых нормативных требований установленным в Республике Беларусь;
- 2) согласования технических условий.

Типовые представители продукции выбираются в случае большого количества однотипной продукции, одинакового конструктивного исполнения, соответствия ее одним и тем же требованиям безопасности, продукции, изготовленной по однотипным принципам, схемам и типовому технологическому процессу. Продукция, из которой выбирается типовой представитель, должна соответствовать одному нормативному документу.

Отбор, маркировку и пломбирование продукции осуществляет представитель органа или центра стандартизации, метрологии и сертификации (ЦСМС), который указан в решении. Одновременно оформляется акт отбора образцов. При идентификации проверяется соответствие маркировки продукции, указанной в товарно-транспортной накладной, маркировке на этикетке, индивидуальной и групповой упаковке.

Испытания образцов проводятся в специально аккредитованных испытательных лабораториях, которые могут быть аккредитованы на техническую компетентность и независимость. Допускается совмещать сертификационные испытания с квалификационными, приемочными, периодическими при соблюдении условий:

- 1) установочная серия или опытная партия должна быть изготовлена на оборудовании серийного производства;
- 2) отбор образцов для испытаний должен быть проведен представителем органа сертификации или ЦСМС;
- 3) испытания должны проводиться в аккредитованной лаборатории с участием представителей органа сертификации или ЦСМС.

Программа испытаний разрабатывается органом сертификации, и образцы вместе с программой представляются в лабораторию.

При отрицательных результатах лаборатория возвращает образцы и протокол в трех экземплярах в орган и заявителю.

Анализ состояния производства проводится по типовой программе, которая в соответствии со спецификой производства должна дорабатываться. Осуществляются следующие мероприятия:

- 1) проводится входной контроль сырья, материалов, комплектующих;
- 2) проводится экспертиза контрактов;
- 3) осуществляется идентификация продукции;
- 4) осуществляется управление процессами;
- 5) проводятся контроль и испытания;
- 6) осуществляется управление контрольным, измерительным и испытательным оборудованием;
- 7) осуществляются корректирующие и предупреждающие действия;
- 8) проводятся погрузочно-разгрузочные работы, хранение, упаковка, маркировка, консервация, поставка;
- 9) осуществляется регистрация данных о качестве.

По результатам оформляется акт анализа производства. Работа по сертификации приостанавливается, если путем корректирующих мероприятий можно устранить недостаток, а если нет, то прекращается. После проведения анализа состояния с протоколом знакомится представитель предприятия.

Анализ представленных материалов с заявлением о соответствии продукции на основе: 1) сертификата на систему качества; 2) протоколов испытаний; 3) информации о технологической дисциплине позволяет принять решение о выдаче сертификата.

Сертификат серии А выдается на продукцию, соответствующую требованиям безопасности (всем указанным в стандарте или отдельным его требованиям).

Сертификат серии Б – на продукцию, соответствующую отдельным требованиям (указывается пункт) или всем требованиям нормативно-технического документа.

На серийную продукцию сертификат выдается на три года, на партию (с указанием ее размера, контракта на поставку) – на один год. В журнале регистрации выданных сертификатов указываются номера бланков. Одновременно с выдачей сертификата на серийную продукцию и продукцию по контракту оформляется соглашение по сертификации, срок действия которого тот же, что и у сертификата. На продукцию, выпускаемую серийно, и на которую выдан сертификат, в соответствии с соглашением по сертификации может наноситься знак соответствия НСС по РСТ Беларуси 915-92.

Орган сертификации определяет периодичность и объем инспекционного контроля. На периодичность и объем инспекционного контроля влияют: 1) потенциальная опасность продукции; 2) стабильность производства; 3) наличие системы качества и др.

Контроль осуществляется не реже одного раза в год. Есть плановый и внеплановый инспекционный контроль в случае, когда поступают претензии к некачественной продукции. После инспекционного контроля оформляется акт, с которым знакомят организацию и принимают решение. По результатам инспекционного контроля орган сертификации может приостановить или отменить действие сертификата и аннулировать соглашение о сертификации.

### **8.5. Оценка конкурентоспособности**

Для ускоренного освоения программы «Всеобщее управление качеством» (TQM) используется методика оценки и самооценки конкурентоспособности предприятий, предложенная Европейским фондом по управлению качеством (ЕФУК). Использование этой методики может быть введено как обязательное для проведения аудитов.

Методика ЕФУК разработана с целью унификации расчетов по определению эффективности работы предприятия, прежде всего для расчетов по оценке конкурентоспособности в сравнении с другими.

В основу оценки и самооценки конкурентоспособности положен подход Европейской организации по качеству (ЕОК) и Европейского фонда по управлению качеством к ускорению процесса внедрения программы «Всеобщее управление качеством» как решающего фактора достижения преимущества в конкуренции на мировом уровне.

«Борьба за качество является одной из предпосылок достижения успеха Вашими компаниями, а также нашего общего успеха» – сказал Жак Делор, Президент Европейской комиссии при подписании в Брюсселе 1988 году письма-обязательства об учреждении ЕФУК.

Все большее число организаций в Европе воспринимает «Всеобщее управление качеством» как способ осуществления своей управленческой деятельности, позволяющий обеспечить высокий организационно-технический уровень, эффективность, преимущества в конкуренции и таким образом – более продолжительный успех в части удовлетворения интересов своих потребителей, служащих, финансовых и других акционеров, а также общества в целом.

Внедрение программы «Всеобщее управление качеством» может привести к получению существенной выгоды, например, к достижению высокого организационно-технического уровня, снижению затрат и повышению уровня удовлетворенности всех заинтересованных сторон, что обеспечит улучшение результатов дела.

Основываясь на наличии таких возможностей, 14 ведущих европейских компаний реализовали в 1998 году инициативу по созданию ЕФУК.

По замыслу учредителей, ЕФУК призван сыграть определяющую роль в повышении организационно-технического уровня и эффективности работы европейских предприятий посредством усиления значимости качества во всех аспектах их деятельности, а также посредством стимулирования и содействия разработкам в области повышения качества.

## **8.6. Модель для ведения бизнеса**

Процесс подготовки информации для оценки требует представления информации о достижениях предприятия в ряде конкретных областей, которые определяются каждым критерием модели ЕФУК.

Критерии модели ЕФУК сформулированы таким образом, чтобы они не воспринимаются как ограничивающие предписания и оставляют достаточную степень свободы в представлении результатов самооценки, уместную конкретных условий.

***Ведомость составляющих критериев.*** При подготовке информации на основе результатов самооценки следует учитывать, что для большинства критериев каждой их составляющей предписана равная весомость, но есть и исключения. Эксперты используют процесс определения балльной оценки по каждому критерию. Ниже представлены факторы, учитываемые при определении балльной оценки по критериям «Средства достижения» и «Результаты».

При определении балльной оценки по критериям «Средства достижения» каждая из составляющих критериев «Средства достижения» оценивается согласно подходу (методам, которые используются в областях и где распространяются составляющие критериев) и степени его реализации.

Балльная оценка определяется с учетом:

- приемлемости применяемых методов, инструментов и средств;
- степени, в которой используемый подход является систематическим и основанным на предотвращении ошибок, а не исправлении их;
- периодичности выполнения анализа;
- внедрения усовершенствований в результате периодического анализа;
- степени, в которой подход интегрирует с повседневной деятельностью.

Степень реализации подхода – это степень реализации полного потенциала применяемого подхода.

Балльная оценка определяется с учетом соответствующего и эффективного внедрения подхода:

- по вертикали на всех соответствующих уровнях;
- по горизонтали на всех соответствующих участках и во всех соответствующих видах деятельности;
- ко всем соответствующим процессам;
- ко всей соответствующей продукции и услугам.

Используется балльная оценка (табл. 8.2) отдельно для критериев «Подход» и «Степень его реализации». Общая сумма процентов затем преобразуется в балльную оценку согласно значениям, указанным на схеме модели ЕФУК.

**Определение балльной оценки по критерию «Результаты».** Каждая из составляющих критерия «Результаты» оценивается согласно степени совершенства представленных результатов и полноте охвата направленной деятельности.

Определение степени совершенства по критерию «Результаты» производится с учетом:

- наличия позитивных тенденций и поддерживаемого хорошего уровня работы;
- сравнения со своими целями;
- сравнения с показателями работы внешних организаций, включая конкурентов и «лучших в классе» (если это уместно);
- доказательств, подтверждающих, что результаты получены с помощью соответствующих подходов.



Таблица 8.2

## Подход и степень его реализации

Подход	Оценка	Степень реализации подхода
Имеются улучшения «анекдотического» характера или не имеющие экономического эффекта	0 %	Применение малоэффективно
Имеются некоторые свидетельства использования серьезных подходов и систем, направленных на предотвращение ошибок. Время от времени проводится анализ. В некоторых областях видна интеграция подхода в повседневные операции	25 %	Подход применен приблизительно на 1/4 потенциальных возможностей, учитывая все соответствующие области и виды деятельности
Имеются свидетельства использования серьезных систематических подходов и систем, направленных на предотвращение ошибок. Регулярно проводится анализ в отношении эффективности бизнеса. Очевидна интеграция подхода в повседневные операции и планирование	25 %	Подход применен приблизительно на 1/2 потенциальных возможностей, учитывая все соответствующие области и виды деятельности
Имеются ясные свидетельства использования серьезных систематических подходов и систем, направленных на предотвращение ошибок. Имеются ясные свидетельства изменений к лучшему и повышения эффективности бизнеса от одного проанализированного цикла самооценки к другому. Очевидна хорошая интеграция подхода в повседневные операции и планирование	50 %	Подход применен приблизительно на 3/4 потенциальных возможностей, учитывая все соответствующие области и виды деятельности
Имеются ясные свидетельства использования серьезных систематических подходов и систем, направленных на предотвращение ошибок. Имеются ясные свидетельства изменений к лучшему и повышения эффективности бизнеса от одного проанализированного цикла самооценки к другому. Подход полностью интегрирован в повседневные рабочие операции. Может быть использован в качестве модели-образца для других организаций	100 %	Подход применен в полном объеме потенциальных возможностей, учитывая все соответствующие области и виды деятельности

Определение критерия «Полнота охвата направлений деятельности» для представленных результатов производится с учетом:

- степени, в которой представленные результаты отражают все соответствующие направления деятельности предприятия;
- степени, в которой представлен весь диапазон результатов в рамках деятельности, оцениваемой по конкретной составляющей критерия;
- степени, в которой понимается и представляется соответствующая значимость полученных результатов.

Оценка (табл. 8.3) осуществляется отдельно по критериям «Результаты» и «Полнота охвата направлений деятельности».

Таблица 8.3

**Результаты и полнота охвата направлений деятельности**

Результаты	Оценка	Полнота охвата направлений деятельности
1	2	3
Результаты «анекдотического» характера	0 %	Результаты получены для небольшого числа областей и видов деятельности
Некоторые результаты показывают наличие положительных тенденций и/или удовлетворительной работы. Некоторые результаты достаточно близки по отношению к поставленным целям	25 %	Результаты получены для некоторых областей и видов деятельности
Многие результаты показывают наличие значительных положительных тенденций и/или устойчивой хорошей работы в течение не менее трех лет. Результаты соответствуют поставленным целям во многих областях. Некоторые результаты сравнимы с показателями работы внешних организаций. Некоторые результаты обусловлены применением подхода	50 %	Результаты получены для многих областей и видов деятельности
Большинство результатов показывает наличие значительных положительных тенденций и/или устойчивой отличной работы в течение не менее трех лет. Результаты соответствуют поставленным целям в большинстве областей. Результаты сравнимы с показателями внешних организаций во многих областях. Многие результаты обусловлены применением подхода	75 %	Результаты получены для большинства областей и видов деятельности
Результаты показывают наличие значительных положительных тенденций и/или устойчивой отличной работы во многих областях в течение не менее пяти лет. Результаты точно соответствуют поставленным целям собственной организации и показателям внешних организаций в большинстве областей. Результаты сравнимы с показателями внешних организаций во многих областях. Предприятие стало «лучшим в классе» во многих областях деятельности	100 %	Результаты получены для всех областей и видов деятельности

**Критерий «Средства достижения».** Оценка осуществляется по каждой составляющей критерия «Средства достижения», принимая во внимание комбинацию двух следующих факторов:

- степень совершенства подхода;
- степень реализации подхода.

Оценивая «Подход» и «Степень его реализации», можно выбрать один из пяти уровней, приведенных в табл. 8.2: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, или можно воспользоваться промежуточными значениями, проведя интерполяцию в интервале между указанными величинами.

**Критерий «Результаты».** Осуществляется оценка по каждой составляющей критерия «Результаты», принимая во внимание комбинацию двух следующих факторов:

- степень совершенства результатов;
- полнота охвата направлений деятельности для представленных результатов.

Оценивая факторы «Результаты» и «Полнота охвата направлений деятельности», можно выбрать один из пяти уровней, приведенных в табл. 8.3: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, или можно воспользоваться промежуточными значениями, проведя интерполяцию в интервале между указанными величинами.

**Критерий «Средства достижения»:**

1. Лидерство руководства

Оценивается поведение и действия администрации и всех других руководителей, то, как они вдохновляют, поддерживают и оказывают содействие внедрению программы «Всеобщее управление качеством» (табл. 19).

Таблица 8.4

**Критерий 1. «Лидерство»**

Подход	Оценка		Степень реализации подхода
	%	Баллы	
1a – руководители демонстрируют явную приверженность программе «Всеобщее управление качеством»	100	25	Высокая степень реализации подхода
1b – руководители оказывают поддержку совершенствованию и привлечению персонала путем обеспечения соответствующими ресурсами и содействия	100	25	-"
1c – руководители осуществляют работу с потребителями, поставщиками и другими внешними организациями	100	25	-"
1d – руководители признают и оценивают достижения персонала	100	25	-"
<b>ВСЕГО:</b>	100		

Требуются доказательства того, что руководители:

1a – демонстрируют явную приверженность программе «Всеобщее управление качеством»;

1b – оказывают поддержку совершенствованию и привлечению персонала путем обеспечения соответствующими ресурсами и содействия;

1c – осуществляют работу с потребителями, поставщиками и другими внешними организациями;

1d – признают и оценивают усилия и достижения персонала.

В заявке информация по составляющим 1a – 1d должна быть представлена отдельно. Каждая составляющая критерия имеет равную долю от числа баллов, присвоенных критерию 1.

## **2. Политика и стратегия**

Оценивается то, как предприятие формулирует, развертывает, пересматривает, вводит в планы и претворяет в жизнь свою политику и стратегию (табл. 8.5).

Представляются доказательства того, что политика и стратегия:

2a – основываются на информации, являющейся уместной и всеохватывающей;

2b – разрабатываются;

2c – доводятся до сведения исполнителей и претворяются в жизнь;

2d – регулярно актуализируются и совершенствуются.

Таблица 8.5.

### **Критерий 2. «Политика и стратегия»**

Подход	Оценка		Степень реализации подхода
	%	Баллы	
2a – политика и стратегия основываются на информации	100 %	20	Высокая степень реализации подхода
2b – стратегия и политика разрабатываются	100 %	20	
2c – стратегия и политика доводятся до сведения исполнителей и претворяются в жизнь	100 %	20	
2d – стратегия и политика регулярно актуализируются и совершенствуются	100 %	20	
<b>ВСЕГО:</b>		<b>80</b>	

В заявке информация по составляющим 2а – 2d должна быть представлена отдельно. Каждая составляющая критерия имеет равную долю от числа баллов, присвоенных критерию 2.

### 3. Руководство персоналом

Представляются доказательства того, что предприятие реализует полный потенциал своего персонала (табл. 8.6):

3а – планируются и улучшаются человеческие ресурсы;

3б – поддерживаются и развиваются способности персонала;

3с – согласовываются цели и непрерывно анализируются результаты работы;

3d – обеспечивается привлечение персонала, наделение его полномочиями и признание заслуг;

3е – обеспечивается эффективность диалога между персоналом и организацией;

3f – осуществляется забота об интересах персонала.

В заявке информация по составляющим 3а – 3f должна быть представлена отдельно. Каждая составляющая критерия имеет равную долю от числа баллов, присвоенных критерию 3.

Таблица 8.6

#### Критерий 3. «Руководство персоналом»

Подход	Оценка		Степень реализации подхода
	%	Баллы	
3а – планируются и улучшаются человеческие ресурсы	100%	15	Высокая степень реализации подхода
3б – поддерживаются и развиваются способности персонала	100 %	15	
3с – согласовываются цели и непрерывно анализируются результаты работы	100 %	15	
3d – обеспечивается привлечение персонала, наделение его полномочиями и признание заслуг	100%	15	
3е – обеспечивается эффективность диалога между персоналом и администрацией	100%	15	
3f – осуществляется забота об интересах персонала	100%	15	
<b>ВСЕГО:</b>		<b>90</b>	

### 4. Ресурсы

Представляются свидетельства того, как предприятие управляет ресурсами для обеспечения производительности и эффективности (табл. 8.7):

4а – осуществляется управление финансовыми ресурсами;

4б – осуществляется управление информационными ресурсами;

4с – осуществляются управление взаимоотношениями с поставщиками и управление материалами;

4d – осуществляется управление зданиями, оборудованием и другими материальными ценностями;

4е – осуществляется управление технологией и интеллектуальной собственностью.

В заявке информация по составляющим 4а – 4е должна быть представлена отдельно. Каждая составляющая критерия имеет равную долю от числа баллов, присвоенных критерию 4.

Таблица 8.7

#### Критерий 4. «Ресурсы»

Подход	Оценка		Степень реализации подхода
	%	Баллы	
4а – осуществляется управление финансовыми ресурсами	100 %	18	Высокая степень реализации подхода
4б – осуществляется управление информационными ресурсами	100 %	18	
4с – осуществляется управление взаимоотношениями с поставщиками и управление материалами	100 %	18	
4d – осуществляется управление зданиями, оборудованием и другими материальными ценностями	100 %	18	
4е – осуществляется управление технологией и интеллектуальной собственностью	100 %	18	
ВСЕГО:		90	

#### 5. Процессы

Представляются доказательства того, как предприятие идентифицирует, управляет, анализирует и совершенствует свои процессы (табл. 8.8):

5а – идентифицируются процессы, являющиеся ключевыми для успешного ведения бизнеса;

5б – осуществляется систематическое управление процессами;

5с – анализируются процессы и ставятся задачи по их совершенствованию;

5d – совершенствуются процессы с помощью нововведений и творческого подхода;

5е – вносятся изменения в процессы и оцениваются полученные преимущества.

В заявке информация по составляющим 5а – 5е должна быть представлена отдельно. Каждая составляющая критерия имеет равную долю от числа баллов, присвоенных критерию 5.

Таблица 8.8

**Критерий 5. «Процессы»**

Подход	Оценка		Степень реализации подхода
	%	Баллы	
5а – интенсифицируются процессы, являющиеся ключевыми для успешного ведения бизнеса	100 %	28	Высокая степень реализации подхода
5б – осуществляется систематическое управление процессами	100 %	28	
5с – анализируются процессы и ставятся задачи по их совершенствованию	100 %	28	
5д – совершенствуются процессы с помощью нововведений и творческого подхода	100 %	28	
5е – вносятся изменения в процессы и оцениваются полученные преимущества	100 %	28	
<b>ВСЕГО:</b>		140	
<b>ИТОГО СРЕДСТВА ДОСТИЖЕНИЯ:</b>		500	

**Критерий «Результаты»**

**6. Удовлетворенность потребителей**

Требуется указать, какие цели поставило перед собой предприятие в отношении удовлетворения интересов своих внешних потребителей (табл. 8.9):

6а – оценка потребителями продукции, услуг и взаимоотношений с организацией;

6б – дополнительные показатели степени удовлетворенности потребителей продукции.

Таблица 8.9

**Критерий 6. «Удовлетворенность потребителей»**

Результаты	Оценка		Полнота охвата направлений деятельности
	%	Баллы	
6а – оценка потребителями продукции, услуг и взаимоотношений с организацией	100 %	150	Высокая степень охвата направлений деятельности
6б – дополнительные показатели степени удовлетворенности потребителей продукции	100 %	150	
<b>ВСЕГО:</b>		300	

В заявке информация по составляющим 6а – 6б должна быть представлена отдельно. Каждая составляющая критерия имеет равную долю от числа баллов, присвоенных критерию 6.

### **7. Удовлетворенность персонала**

Требуется указать, какие цели поставило перед собой предприятие в отношении удовлетворения интересов своего персонала (см. табл. 8.9):

7а – оценка организации ее персоналом;

7б – дополнительные показатели степени удовлетворенности персонала предприятия.

В заявке информация по составляющим 7а – 7б должна быть представлена отдельно. Каждая составляющая критерия имеет равную долю от числа баллов, присвоенных критерию 7.

### **8. Влияние на общество**

Указывается, какие цели поставило перед собой предприятие в отношении удовлетворения потребностей и ожиданий местного, национального мирового общества в целом (соответственно уровню). Это включает восприятие применяемого подхода к качеству жизни, мер по охране окружающей среды и сохранению мировых ресурсов, а также применяемых предприятием внутренних показателей эффективности. Требуется указать (табл. 26):

8а – оценку организации обществом;

8б – дополнительные показатели воздействия организации на общество.

В заявке информация по составляющим 8а – 8б должна быть представлена отдельно. Каждая составляющая критерия имеет равную долю от числа баллов, присвоенных критерию 8.

### **9. Результаты бизнеса**

Указываются достижения организации в отношении своих запланированных целей в области бизнеса и в удовлетворении потребностей и ожиданий каждого, имеющего финансовый или иной интерес в работе организации. Требуется указать (табл. 27):

9а – финансовые показатели деятельности организации;

9б – дополнительные показатели деятельности организации.

В заявке информация по составляющим 9а – 9б должна быть представлена отдельно. Каждая составляющая критерия имеет равную долю от количества баллов, присвоенных критерию 9.

Таким образом, общая максимальная оценка для предприятия – это 1000 баллов.



## Глава 9. ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ РЭС

### 9.1. Общие принципы оценки качества цифровых устройств РЭС

Для оценки качества аналоговых РЭС используются их функциональные или электрические схемы, на которых указаны номинальные числовые значения физических величин (напряжений, токов, частот, фазовых сдвигов и т.п.) и формы сигналов в контролируемых точках. Последовательно проверяя участки схемы, с помощью технических средств измерения можно обнаружить отказавшие элементы и блоки.

В цифровых же РЭС электрические сигналы представляют собой наборы импульсов различных уровней напряжений (например, логических единиц  $U^1 = 2,4$  В и нулей  $U^0_{Bbix} = 0,8$  В). Дискретный поток данных в контролируемой схеме – очень сложный и непрерывно изменяющийся в короткие промежутки времени. При этом напряжения, токи и частота следования импульсов могут находиться в пределах допусков, а само контролируемое цифровое устройство – в неработоспособном состоянии: последовательность прохождения дискретных данных не соответствует заданному алгоритму работы. В этом главная сложность и особенность контроля качества цифровых РЭС.

Возникают также и проблемы оценки состояния отдельных цифровых элементов и схем, например, больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных схем. Дело в том, что в одной БИС смонтированы сотни тысяч отдельных элементов, а возможность доступа к «контрольным точкам» внутри БИС практически исключена. Если бы такая возможность и имела, то все равно контроль цифровых устройств с помощью традиционных средств измерения превратился бы в трудновыполнимую технологическую операцию.

Таким образом, широкое внедрение цифровых РЭС требует особой методики и организации контроля, а также разработки и производства принципиально новой контрольно-измерительной аппаратуры.

Процесс контроля цифровых устройств с целью оценки их качества называется тестированием.

Вопросы тестирования цифровых устройств РЭС должны учитываться еще на этапе их проектирования. По мере повышения степени интеграции применяемых в РЭС микросхем усложняются и процедуры тестирования. При этом наряду со сложной контрольной аппаратурой и средств-

вами программирования сохраняется тенденция использования и простейших пробников логических состояний, стимулирующих генераторов и индикаторов импульсных токов.

В новейших цифровых устройствах, как правило, предусматривается внутренний самоконтроль, часто называемый *самотестированием*. Примером самотестирования может служить самоконтроль работоспособности основных блоков и устройств компьютера.

Самотестирование предполагает применение в объекте контроля встроенных элементов и схем диагностики, а также специальных тест-программ. Разработаны и методы самотестирования. Среди них известны метод сквозного сдвигающего регистра, метод встроенного контроля логических блоков и метод микробит.

Кратко поясним сущность одного из наиболее распространенных методов самотестирования – метода сквозного сдвигающего регистра, предназначенного для опроса (сканирования) состояния как отдельных микросхем, плат, так и цифровой системы в целом. При проектировании цифрового устройства в его структуре предусматриваются специальные элементы памяти.

На рис. 9.1 показана схема подключения к управляющему триггеру  $T_1$  триггера памяти  $T_2$ .

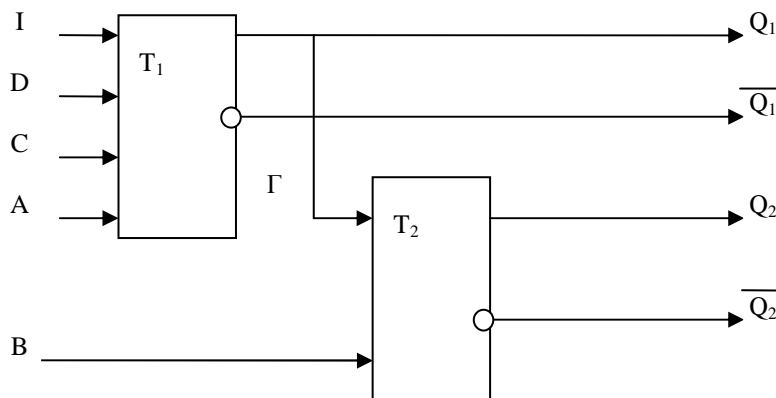


Рис. 9.1. Схема подключения триггера памяти  $T_2$  к управляющему триггеру  $T_1$

Подобные пары триггеров объединяются в многоразрядный сдвигающий регистр, причем к выходу триггера  $T_2$  ( $Q_2$ ) каждого предыдущего разряда регистра подключается вход  $I$  триггера  $T_1$  последующего разряда. На вход  $D$  младшего разряда регистра подается тестируемая двоичная последовательность – данные.

Когда из объекта тестирования на вход С поступает синхронизирующий сигнал, триггер  $T_1$  устанавливается в положение, соответствующее биту данных на входе D. На входы А и В попеременно подключаются тактовые импульсы, под действием которых биты данных сдвигаются по регистру. Образовавшийся на входе разряд битов сопоставляется с хранимым в ПЗУ словом – разрядом бит работоспособного состояния тестируемого устройства.

Методы встроенного контроля логических блоков и микробит разработаны для тестирования сложных микропроцессорных систем и микроЭВМ. Эти методы основаны на применении сигнатурного и логического анализа.

Прежде чем подробно излагать эти методы, рассмотрим классификацию элементов цифровых РЭС.

## 9.2. Классификация элементов цифровых РЭС

Цифровые РЭС состоят из электронных элементов (ЭЭ), которые представляют собой совокупность определенным образом соединенных резисторов, емкостей, индуктивностей, диодов, транзисторов, выполняющих одну или несколько логических или вспомогательных функций.

По назначению ЭЭ подразделяются на логические, запоминающие, усилительно-формирующие и специальные.

По конструктивно-технологическому и функциональному решению современные ЭЭ цифровых РЭС построены в основном на интегральных микросхемах (ИС).

Как известно, ИС делятся на аналоговые и цифровые. К аналоговым относятся ИС, предназначенные для преобразования и обработки информации (радиосигналов), изменяющейся по закону непрерывной функции. Аналоговые интегральные микросхемы (АИМС) наиболее часто используются в аналоговых усилителях, фильтрах, генераторах электромагнитных колебаний, коммутаторах и т.п. В связи с широким набором функций, выполняемых АИМС, входной контроль подобных изделий связан с многочисленными измерениями электрических и временных величин (в среднем 20 – 30).

К цифровым интегральным микросхемам (ЦИМС) относятся устройства, с помощью которых преобразуются и обрабатываются сигналы, выраженные в двоичном и другом дискретном коде. Одним из вариантов определения ЦИМС является термин «логическая микросхема», в которой операции с двоичными кодами могут быть описаны методами алгебры логики.

По технологическому исполнению ИС могут быть полупроводниковыми, пленочными и гибридными. В полупроводниковой ИС все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника.

В пленочной ИС все элементы и межэлементные соединения выполнены в виде пленок. Пленочные ИС подразделяются на тонкопленочные (с толщиной пленок до 1 мкм) и толстопленочные (с толщиной свыше 1 мкм).

Гибридные ИС содержат, кроме элементов, простые и сложные компоненты. Например, гибридная ИС может содержать несколько бескорпусных ИС на одной подложке.

По типу основной логической схемы ИС разделяются на схемы с транзисторно-транзисторной логикой (ТТЛ), эмиттерно-связанной логикой (ЭСЛ) и схемы на основе МОП (металл – оксид – полупроводник) структур.

По быстродействию и мощности потребления ИС могут быть сверхбыстродействующие (до 5 нс, 50 – 1000 мВт); среднего быстродействия (10 – 50 нс, 10 – 50 мВт); медленно действующие (свыше 50 нс, 0,01 – 1 мВт).

Схемы типов ТТЛ и ЭСЛ являются быстродействующими, а схемы МОП-структур – медленно действующими.

### **11.2.1. Логические элементы цифровых РЭС**

Схемы элементов цифровых РЭС условно можно разделить на два класса.

К первому классу относятся схемы, в которых значения выходных сигналов однозначно определяются значениями входных сигналов в тот же момент времени. Такие схемы называются комбинационными. В схемах второго класса выходные сигналы определяются не только значениями входных сигналов в данный момент времени, но и состоянием схемы, которое зависит от сигналов, поданных на ее входы в предыдущие моменты времени. Такие схемы содержат элементы памяти – триггеры.

Для описания законов функционирования комбинационных схем, в которых информация обрабатывается в двоичном коде (0,1), обычно используются методы алгебры логики. Основу построения комбинационных схем составляют три функции – инверсия, конъюнкция и дизъюнкция. Практически эти функции реализуются с помощью логических элементов НЕ, И и ИЛИ (рис. 9.2).

Инверсия – функция одной переменной (одноместная функция), которая реализует логическую операцию НЕ (отрицание), то есть  $y = f(x) = \bar{x}$ .

Электрическая схема и условное обозначение инвертора показаны на рис. 9.2, а.

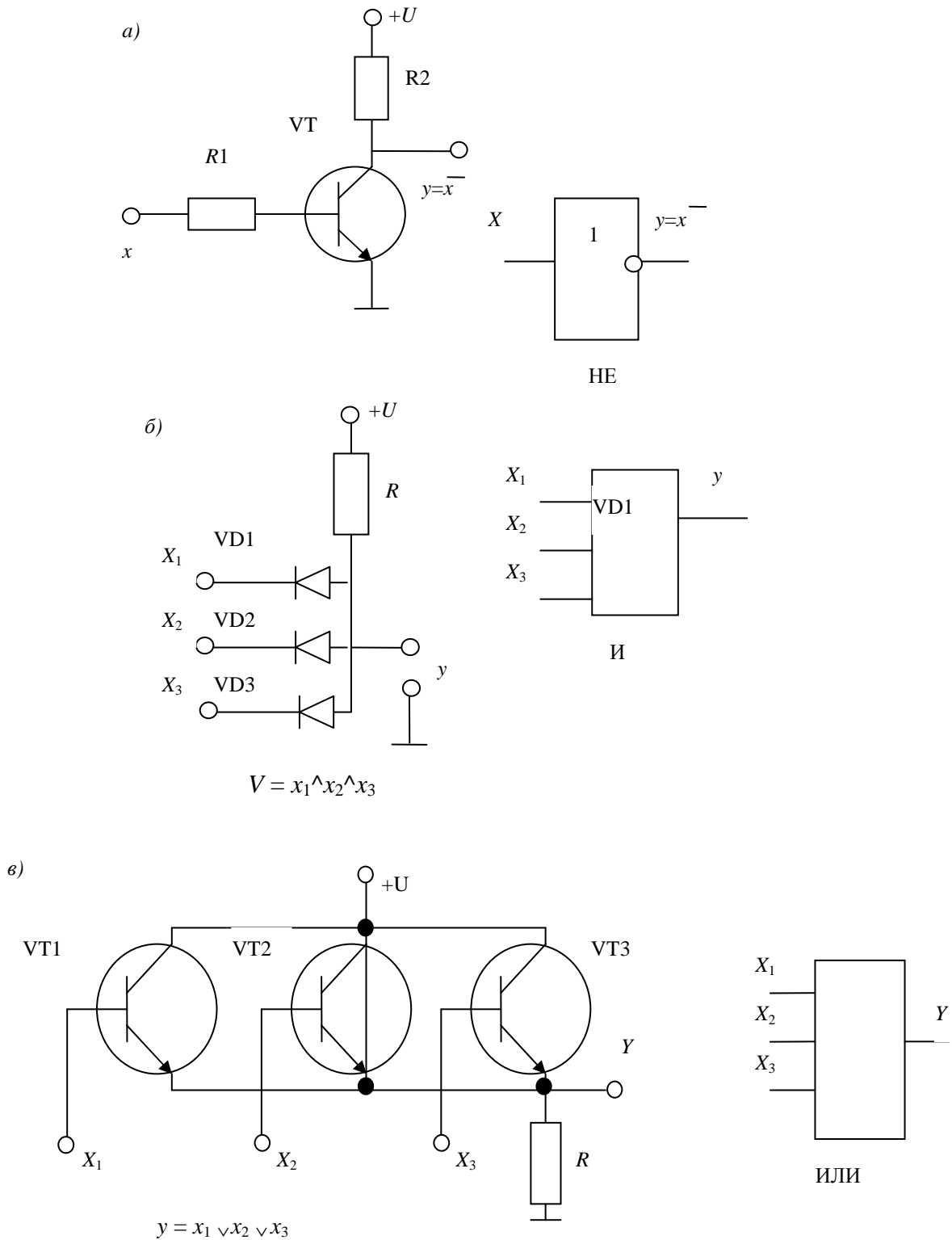


Рис. 9.2. Схемы логических элементов и их условные обозначения

При отсутствии на входе этой схемы сигнала  $x = 0$  на ее выходе будет высокое напряжение, соответствующее уровню логической 1: транзистор VT находится в режиме отсечки (закрыт), и его внутреннее сопротивление велико. Подача на вход сигнала  $x = 1$  приведет к тому, что на выходе инвертора будет низкое напряжение: транзистор VT находится в режиме насыщения (открыт), и его внутреннее сопротивление мало. На выходе схемы появится сигнал, соответствующий логическому 0.

Конъюнкция и дизъюнкция рассматриваются как функции от многих переменных (многоместные функции). Для их обозначения вместо специальных символов Л и V часто используются символы  $\cdot$  и  $+$ , принятые в обычной алгебре для умножения (конъюнкция) и суммирования (дизъюнкция).

Пример схемы, реализующей логическую функцию И, приведен на рис. 9.2, б, т.е.  $y = f(x_1, x_2, x_3) = x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ . Операция умножения в этой схеме выполняется с помощью диодов. Если на входы  $x_1, x_2, x_3$  подать напряжения, соответствующие логическим единицам, то диоды VD1 – VD3 будут закрыты, ток через них проходить не будет и на выходе схемы появится высокое напряжение, соответствующее логической 1. В случае, когда хотя бы на одном из входов  $X_i$  ( $i = 1, 3$ ) будет низкое напряжение, соответствующее логическому 0, то ток от источника питания  $+U$  пройдет через открытый диод и напряжение на выходе схемы будет соответствовать логическому 0.

Возможные состояния схемы И (таблица истинности) характеризуются данными, представленными в табл. 9.1.

На рис. 9.2, в показана схема включения транзисторов в цепь по схеме с общим коллектором. Эта цепь является повторителем входного сигнала и осуществляет операцию дизъюнкции входных сигналов – логическое сложение, т.е.  $y = f(x) = x_1 \vee x_2 \vee x_3 = x_1 + x_2 + x_3$ . Условное обозначение схемы ЗИЛИ приведено на рис. 9.2, в, а таблица истинности имеет вид табл. 9.2.

Таблица 9.1

**Таблица истинности схемы И**

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	1	0	0
1	0	1	0
1	1	1	1

Таблица истинности схемы ИЛИ

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1

### 11.2.2. Логические элементы ТТЛ-типа

Транзисторно-транзисторные элементы появились как результат развития схем диодно-транзисторной логики (см. рис. 9.2, б), в которых диоды заменены многоэмиттерным транзистором (МЭТ). МЭТ отличается от обычного транзистора тем, что имеет несколько независимых друг от друга эмиттеров и один коллектор.

Работу МЭТ поясним на примере простой схемы 4И-НЕ, показанной на рис. 9.3.

1	1	0	1
1	1	1	1

Рис. 9.3. Распределение токов в многоэмиттерном транзисторе в схеме И-НЕ

Если на один из входов  $x(i = 1,4)$  подано напряжение, соответствующее уровню логической 1 ( $U^1_{Вх}$ ), эмиттеры входного транзистора VT1 не получают открывающего тока смещения. При этом ток, поступающий в базу VT2 через резистор R1, течет от источника  $+U$  через эмиттерный переход. Транзистор VT2 оказывается в режиме насыщения, и напряжение на выходе схемы (рис. 9.4, а) соответствует уровню логического 0 ( $U^0_{Вых}$ ). Если на один из входов подано напряжение логического 0 ( $U^0_{Вых}$ ), переход база – эмиттер МЭТ смещается в прямом направлении (см. рис. 9.4, б). Ток через резистор R1 потечет в эмиттерный переход VT1.

При этом ток коллектора МЭТ уменьшается, транзистор VT2 переходит в режим отсечки и напряжение на выходе схемы становится равным уровню логической 1 ( $U^1_{вых}$ ).

Более универсальной схемой ТТЛ-типа является ключ со сложным инвертором – двухполярным выходом (рис. 9.5).

Применение сложного инвертора, по сравнению с простой схемой, позволяет увеличить быстродействие, помехоустойчивость и снизить требования к изменению параметров транзисторов.

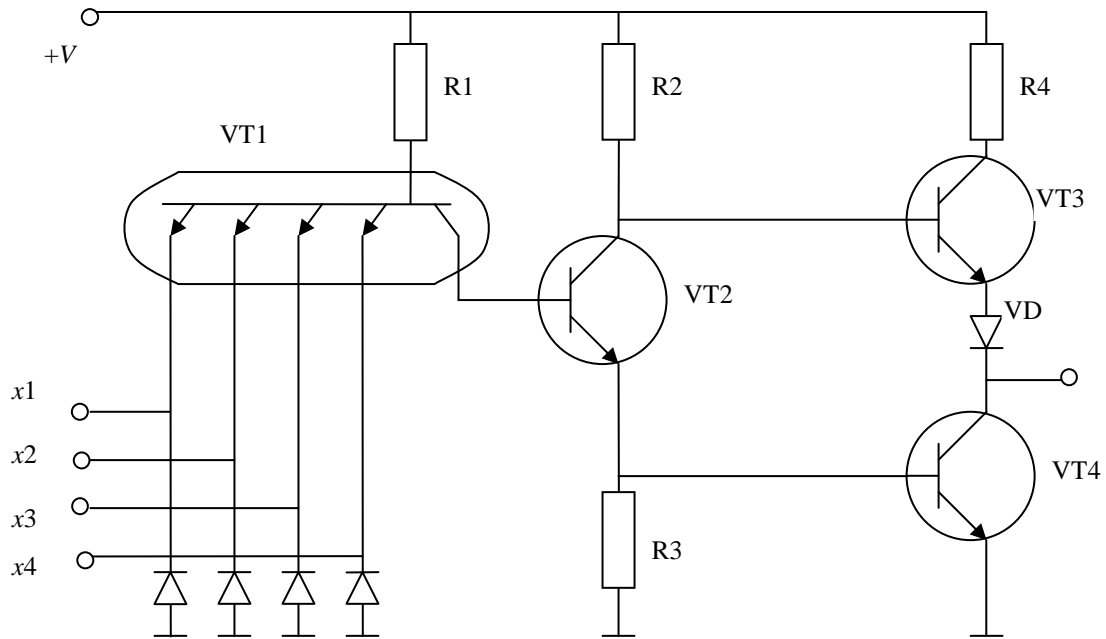


Рис. 9.4. Схема 4И-НЕ со сложным инвертором

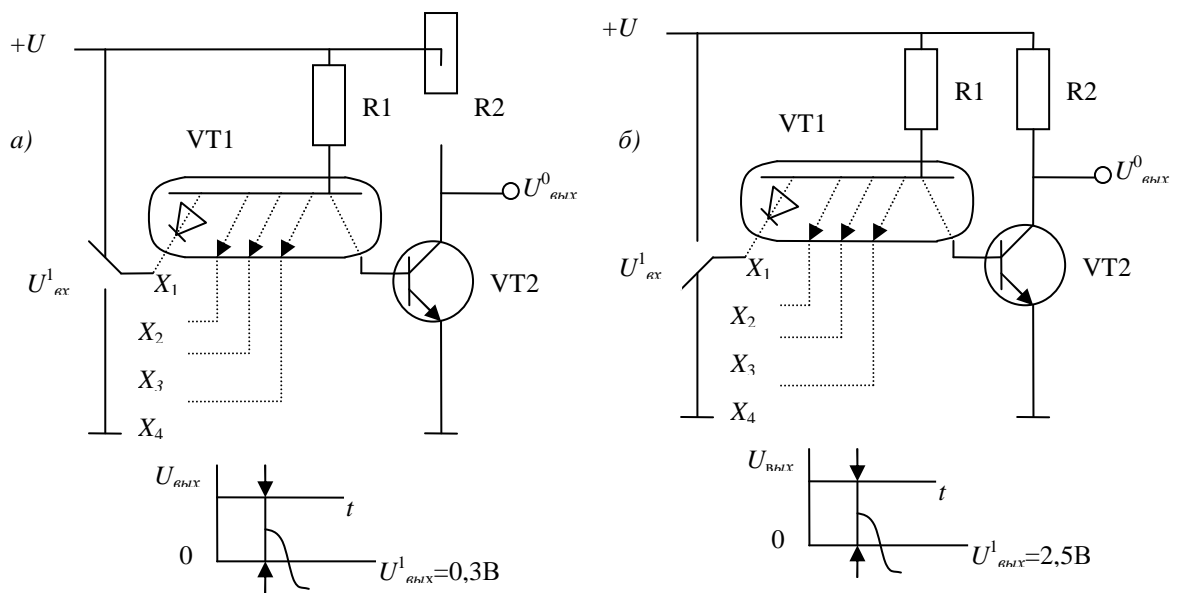


Рис. 9.5. Распределение токов в многоэмиттерном транзисторе в схеме И-НЕ

### 11.2.4. Логические элементы на МОП-структурах

Эти элементы, в отличие от элементов ТТЛ- и ЭСЛ-типа, обладают рядом преимуществ: имеют меньшую мощность потребления энергии, большую нагрузочную способность и помехоустойчивость, занимают маленькую площадь на поверхности ИС, дешевле в производстве. Однако



подобные элементы имеют достаточно большое время задержки – порядка 50 – 100 нс. В этой связи элементы на МОП-структурах применяются в цифровых РЭС с высокой степенью интеграции и не очень высокого быстродействия.

В логических элементах на МОП-структурах, как правило, используются полевые транзисторы n- и p- типов.

Схемы, реализующие функции И или ИЛИ, строятся соответственно последовательным и параллельным включением МОП-транзисторов. При этом на выходе получают функции И-НЕ или ИЛИ-НЕ (рис. 9.6).

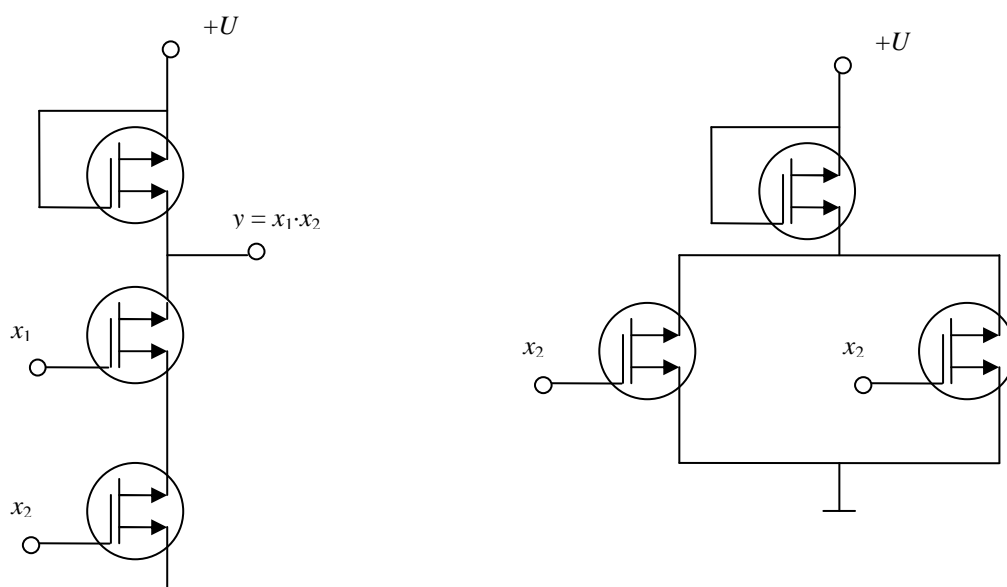


Рис. 9.6. Схемы логических элементов на МОП-структурах: элемент И-НЕ с нагрузочным транзистором (а); элемент ИЛИ-НЕ с нагрузочным транзистором (б)

Как видно на рис. 9.6, в схемах логических элементов вместо активных нагрузок в токовых цепях используются дополняющие транзисторы. Схемы с дополняющими транзисторами отличаются малой мощностью потребления и более высоким быстродействием, так как в цепях заряда и разряда паразитных емкостей оказываются включенными малые сопротивления открытых транзисторов.

### 11.2.5. Триггеры интегральных схем

Триггером называется электронное устройство, с помощью которого можно записывать, хранить и считывать двоичную информацию. Триггер имеет два устойчивых состояния: одно из устойчивых состояний принима-

ется за логическую 1, а второе за логический 0. Схема простейшего триггера на элементах ИЛИ-НЕ показана на рис. 9.7.

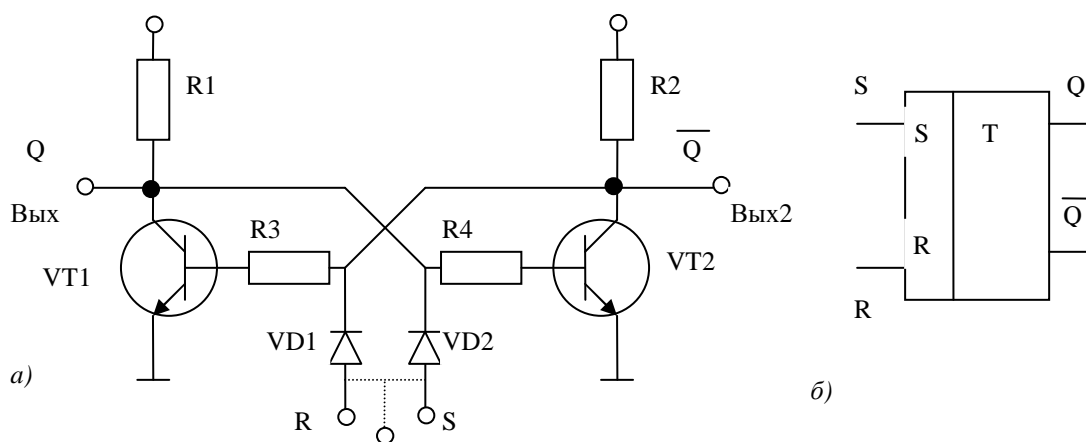


Рис. 9.7. Схема триггера на транзисторных элементах ИЛИ-НЕ (а) и его условное обозначение (б)

Под воздействием управляющих сигналов, подаваемых на входы R, S, триггер скачкообразно переходит из одного устойчивого состояния равновесия в другое. При  $R = 1$  и  $S = 0$  триггер устанавливается в нулевое состояние ( $Q = 0$ ), при  $R = 0$  и  $S = 1$  – в единичное состояние ( $Q = 1$ ), при  $R = 0$  и  $S = 0$  триггер сохраняет состояние, в котором он находился до поступления на его входы нулевых сигналов (табл. 9.3).

Таблица 9.3

Таблица состояний асинхронного RS-триггера

$t$		$t + 1$	
R	S	Q	
0	0	0/1	хранение 0 и 1
0	1	1	установка 1
1	0	0	установка 0
1	1	-	запрещено

При  $R = 1$  и  $S = 1$  на прямом и инверсном выходах устанавливается нулевой сигнал. Триггерная схема превращается в два независимых инвертора, и при переходе к хранению информации ( $R = S = 0$ ) триггер может устанавливаться в любое состояние. Поэтому комбинация  $R = S = 1$  входных сигналов запрещена.

Работа триггера зависит от количества входов и особенностей схемы. Соответственно и схемы триггеров подразделяются на несколько типов: RS-триггеры с установочными входами R-, S-, T-триггеры со счетным вхо-

дом; одноходовые D-триггеры; универсальные JK-триггеры. Кроме того, триггеры бывают одноктактными и двухтактными, асинхронными и синхронизируемыми.

В случае занесения информации в триггер с любого входа без синхронизирующего сигнала триггер называется асинхронным.

Если хотя бы с одного входа информация в триггер заносится принудительно под воздействием синхронизирующего сигнала, то триггер называется синхронизируемым.

Условное обозначение триггеров представлено на рис. 9.8.

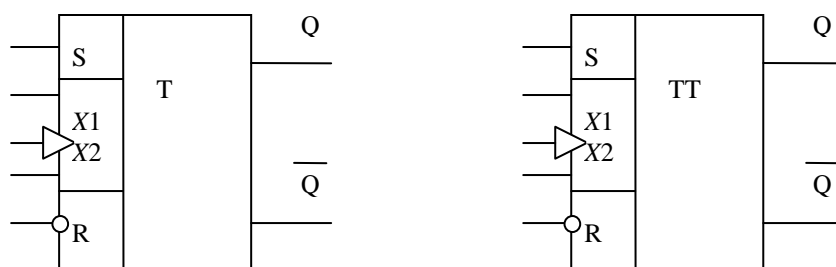


Рис. 9.8. Условное обозначение триггеров с прямыми (а) и инверсными (б) входами

Наибольшее распространение получили универсальные двухтактные J-триггеры (рис. 9.9). У этого триггера имеются символы T и TT и т.д., а также входы R и S несинхронизированной установки.

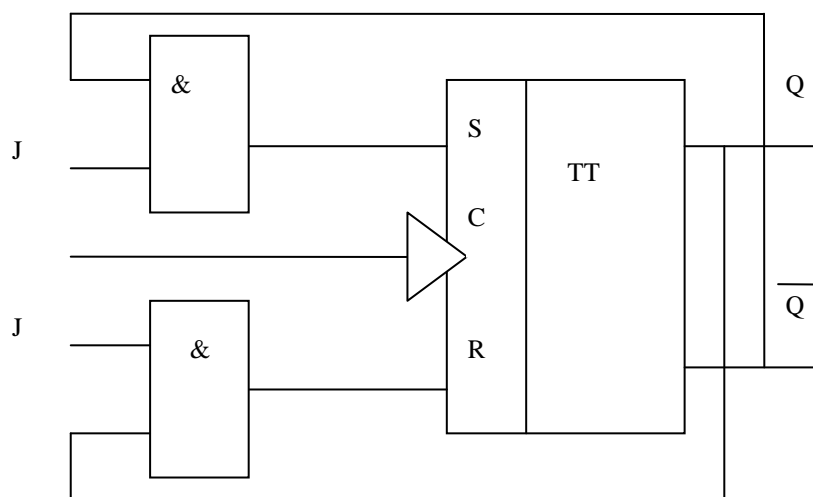


Рис. 9.9. Схема универсального двухтактного JK-триггера

Сочетание сигналов  $C = 0$ ,  $R = 1$  и  $S = 0$  вызывает переход в состояние 1, а сочетание  $C = 0$ ,  $R = 0$  и  $S = 1$  – в состояние 1.

При наличии синхронизируемых сигналов ( $C = 1$ ) и  $R = S = 1$  JK-триггер под действием сигналов входов J и K может переходить в состояния, приведенные в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Состояния JK-триггера

$t$		$t + 1$	Применения
J	K	Q	
0	0	$Q(t)$	Хранение 0 или 1
0	1	0	Установка 0
1	0	1 $Q(t)$	Установка 1
1	1		Инерсия состояния

С помощью внешних цепей подключения J-триггер может быть преобразован в одноразрядный счетчик, т.е. выполнять роль T-триггера, когда единичный сигнал меняет состояние триггера на противоположное, а нулевой оставляет состояние триггера без изменения.

Собранный на основе универсального JK-триггера D-триггер соответствует RS-триггеру, работающему только в режиме установки 1 или 0, с возможностью хранения информации с помощью входа C ( $C = 0$  – режим хранения).

### 11.3. Технические характеристики и контролируемые параметры ИМС

При выборе элементной базы для проектируемых цифровых РЭС особое внимание уделяется техническим характеристикам изделий. Для ИМС к таким характеристикам относятся: быстродействие, помехоустойчивость, нагрузочная способность и потребляемая мощность.

Рассмотрим эти характеристики более подробно на примере интегральных схем транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ).

#### *Быстродействие*

Быстродействие ИМС оценивается средним временем переключения из одного логического состояния в другое (рис. 9.10) и равно

$$t_{3.cп} = (t_3^{10} + t_3^{01})/2, \quad (9.1)$$

где  $t_3^{10}$  – время задержки переключения интегральной схемы из состояния логической 1 в состояние логического 0;  $t_3^{01}$  – то же, из состояния логического 0 в состояние логической 1.

Значения времени  $t_3^{10}$  и  $t_3^{01}$  измеряются на уровне 1,5 В (порог переключения) и состоят из двух этапов переходного процесса

$$\begin{cases} t_3^{10} = t^+ + 0,5t^+; \\ t_3^{01} = t_3^- + 0,5t_3^-, \end{cases} \quad (9.2)$$

где  $t_3^+$  – задержка времени включения, в течение которого происходит заряд барьерных емкостей транзисторов и паразитной емкости изолирующего р-п-перехода;  $t_3^-$  – время выключения, которое определяется временем рассасывания избыточного заряда, накопленного в области коллектора выходного транзистора;  $t_\phi^+$  – время включения цепи (фронт нарастания), в течение которого происходит накопление неосновных носителей в базе выходного транзистора, а также перезаряд барьерной емкости коллекторного перехода и заряд нагрузочной емкости, подключенной к выходу ИМС;  $t_\phi^-$  – время выключения цепи (фронт спада), которое определяется временем рассасывания неосновных носителей в базе, перезаряда емкости коллекторного перехода и заряда емкости нагрузок.

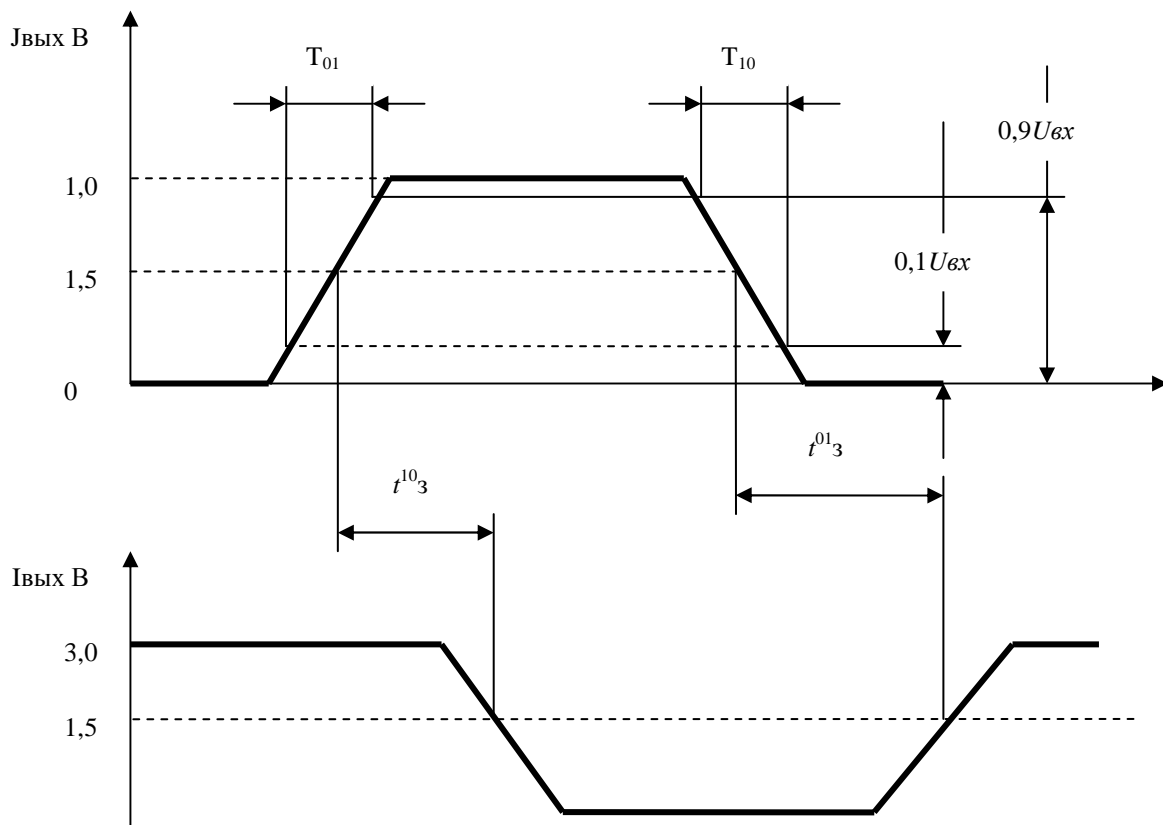


Рис. 9.10. Временная диаграмма ИМС ТТЛ-типа

В качестве контролируемых параметров, с помощью которых определяется быстродействие ИМС, используются величины  $t_3^{01}$  и  $t_3^{10}$ . Например, для ИМС TTL-типа среднего быстродействия  $t_3^{10} < 12$  нс,  $t_3^{01} < 20$  нс. Как следует из (9.1),  $t_{3.ср} < 16$  нс.

### *Помехоустойчивость*

Помехоустойчивость ИМС определяется величиной максимального напряжения, на которое можно изменить логические уровни напряжений на входе ИМС, не вызывая изменения напряжения на ее выходе, большего чем граничные значения логического 0 или логической 1. Это понятие относится и к электронному устройству, состоящему из большого количества ИМС, если учесть минимальное и максимальные значения напряжений в соответствующих состояниях.

Допустимое напряжение помехи (статической) определяется с помощью передаточных характеристик  $U_{вых} = f(U_{вх})$ , в которых учтены технологические отклонения параметров элементов ИМС. При этом можно выделить помехоустойчивость по отношению к отпирающим помехам (рис. 9.11).

$$U = U_{вх.н\ max}^0 - U_{вых.н\ max}^0 \quad (9.3)$$

и по отношению к запирающим

$$U_n^- = U_{вх.н\ min}^1 - U_{вых.н\ min}^1, \quad (9.4)$$

где  $U_{вых.н\ max}^0$  и  $U_{вых.н\ min}^1$  – максимальное и минимальное значения логического 0 и логической 1 на выходе ИМС, а  $U_{вх.н\ max}^0$  и  $U_{вх.н\ min}^1$  – максимальное и минимальное значения напряжения на входе ИМС, характеризующие пороги ее открывания и закрывания.

При отсутствии технологических отклонений параметров в ИМС, влияния внешних условий и минимальной зоны переключения для «идеальной» передаточной характеристики (кривая 1 на рис. 9.11) должно выполняться условие

$$U_{II}^+ + U_{II}^- = U_n, \quad (9.5)$$

где  $U_n$  – напряжение логического перепада.

Если

$$U_{II}^+ + U_{II}^- = 0,5U_n, \quad (9.6)$$

то помехоустойчивость по отношению к обоим типам помех будет максимальной. В реальных условиях серии ИМС имеют технологический разброс параметров, максимальные отклонения которых приводят к искажению передаточной характеристики (кривая 2 на рис. 9.11).

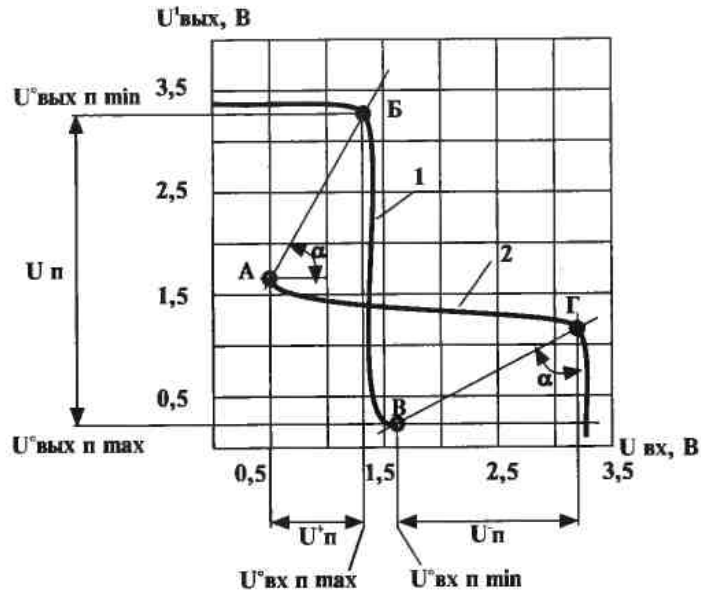


Рис. 9.11. Передаточные характеристики ИМС ТТЛ-типа

Проекции от АБ и ВГ, соединяющие пороговые точки ИМС, на ось абсцисс позволяют определить величины помехоустойчивости  $U_p^+$  и  $U_p^-$ . Очевидно, что при  $\alpha = 45^\circ$  значения указанных величин будут оптимальными. Любые отклонения от этого условия приводят к понижению помехоустойчивости по отношению хотя бы к одному типу помех.

Как видно из рис. 9.11, численные значения величин

$$U_n^+ = 1,15 \text{ В} - 0,25 \text{ В} = 0,9 \text{ В}; \quad U_n^- = 3,14 \text{ В} - 1,64 \text{ В} = 1,5 \text{ В}.$$

На практике для большинства ИМС ТТЛ-типа установлена гарантированная величина помехоустойчивости  $U_p^+$  и  $U_p^- = 0,4 \text{ В}$ .

#### Нагрузочная способность

Нагрузочная способность  $n$  определяет допустимое число ИМС, которые можно подключить к управляющей электронной цепи (рис. 9.12). При этом выходной ток предыдущего каскада  $I_{вых}$  должен быть больше допустимого суммарного тока цепей нагрузок последующего каскада, т.е.  $I_{вх} < I_{вых}$ .

Тогда при идентичности входных токов подключенных ИМС получим

$$n = I_{вых} / I_{вх}. \quad (9.7)$$

Входные и выходные характеристики ИМС ТТЛ-типа изображены на рис. 9.13 и 9.14. На входной характеристике обозначены напряжения  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$ , соответствующие выходным напряжениям логического 0 и логической 1.

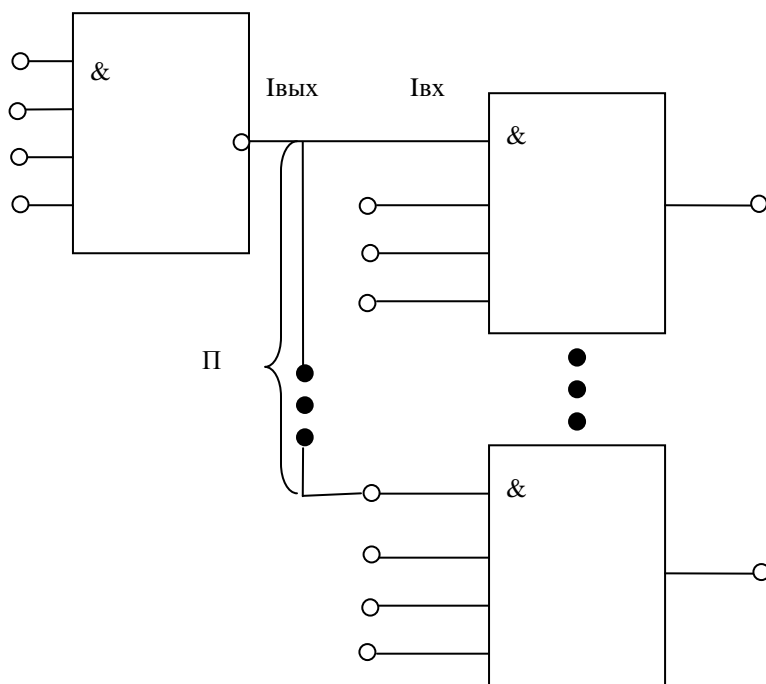


Рис. 9.12. Соединение каскадов ИМС

При напряжении  $U_{ВХ1}$  из ИМС вытекает ток  $I_{Евх}$  (см. рис. 9.13). При аналогичном напряжении на выходе ИМС в выходную цепь втекает ток  $I_{Евых}$  (рис. 9.14).

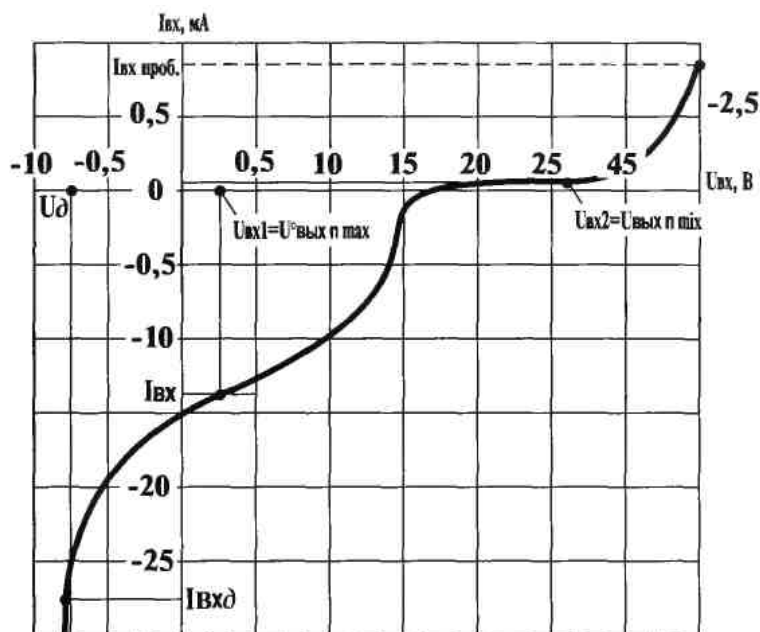


Рис. 9.13. Входные характеристики ИМС ТТЛ-типа



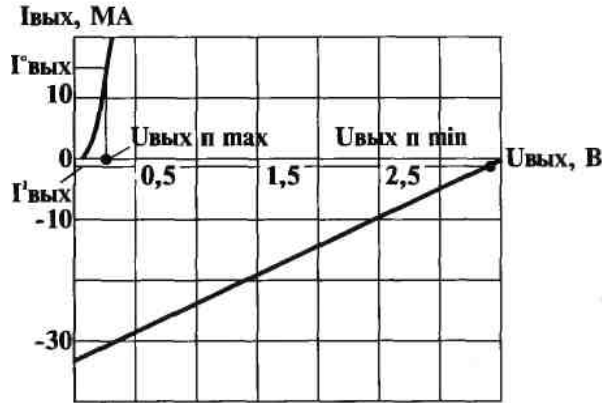


Рис. 9.14. Выходные характеристики ИМС ТТЛ-типа

Таким образом, нагрузочная способность ИМС в открытом состоянии, соответствующем логическому 0 на выходе, определяется отношением

$$n(\text{лог. «0»}) = I_{\text{вых}}^0 / I_{\text{вх}}^0, \quad (9.8)$$

а нагрузочная способность ИМС в состоянии логической 1

$$n(\text{лог. «1»}) = I_{\text{вых}}^1 / I_{\text{вх}}^1. \quad (9.9)$$

Из формул (9.8), (9.9) следует очевидный вывод: для проверки нагрузочной способности ИМС необходимо измерять входные и выходные токи при заданных значениях входных и выходных напряжений. Таким образом, нагрузочная способность ИМС в открытом состоянии, соответствующем логическому 0 на выходе, определяется отношением

$$n(\text{лог. «0»}) = CX_x, \quad (9.10)$$

а нагрузочная способность ИМС в состоянии логической 1

$$n(\text{лог. «1»}) = 1_{\text{вых}} L_{\text{вх}}. \quad (9.11)$$

Из формул (9.10), (9.11) следует очевидный вывод: для проверки нагрузочной способности ИМС необходимо измерять входные и выходные токи при заданных значениях входных и выходных напряжений.

К изложенному выше следует добавить, что гарантированную помехоустойчивость и нагрузочную способность ИМС можно обеспечить, если измерять четыре контролируемых параметра, приведенных в табл. 9.5.

Выбор контролируемых параметров (см. табл. 9.5) обосновывается тем, что на выходных характеристиках ИМС пороговые точки находятся на крутых участках, т.е. при небольших изменениях выходных напряжений положения точек могут изменяться на значительную величину. Поэтому с целью повышения точности измерений задаются выходными токами и измеряют выходные напряжения.

Контролируемые параметры ИМС

Контролируемые параметры	Задаваемые параметры
$U^0_{вых.н \max}$	$U^1_{вх.н \min}; I^0_{вых}$
$U^1_{вых.н \min}$	$U^1_{вх.н \max}; I^1_{вых}$
$I^1_{вх}$	$U_{вх} = U^1_{вх.н \min}$
$I^0_{вх}$	$U_{вх} = U^0_{вых.н \max}$

**Пример.** Определим нагрузочную способность ИМС ТТЛ-типа, воспользовавшись входной и выходной характеристиками, показанными на рис. 9.13 и 9.14, а также отношениями (9.8) и (9.9):

$$n(\text{лог.}\langle 0 \rangle) = I^0_{вых}/I^0_{вх} = 15 \text{ мА}/1,4 \text{ мА} = 10,7;$$

$$n(\text{лог.}\langle 1 \rangle) = I^1_{вых}/I^1_{вх} = 0,4 \text{ мА}/0,04 \text{ мА} = 10.$$

Следовательно, к рассматриваемой ИМС можно подключить 10 од- нотипных нагрузок.

#### Потребляемая мощность

Средняя мощность, потребляемая ИМС, определяется выражением

$$P_{ср} = E_n[(I^0_n + I^1_n)/2], \quad (9.12)$$

где  $I^0_n$  и  $I^1_n$  – потребляемые токи в состояниях логического 0 и логической 1.

Для оценки потребляемой мощности необходимо контролировать токи  $I^0_n$  и  $I^1_n$  при напряжениях на входе ИМС в соответствии с вольтамперной характеристикой (рис. 9.15).

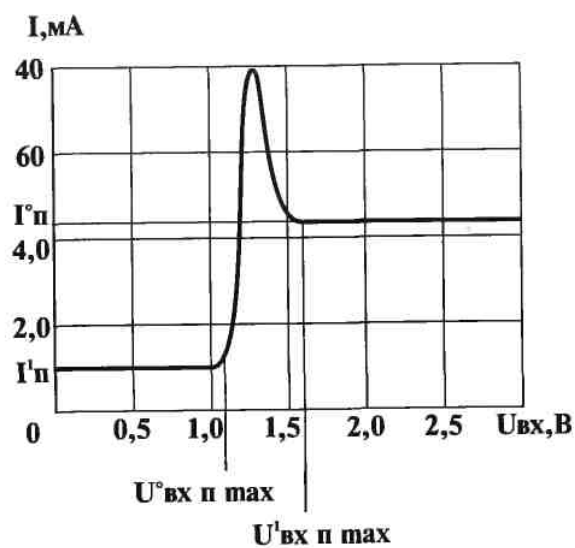


Рис. 9.15. Зависимость тока потребления от входного напряжения ИМС ТТЛ-типа

Следует также заметить, что для ИМС ТТЛ-типа в области зоны переключения (между значениями  $U_{\text{вх.}n}^0 \text{ max}$  и  $U_{\text{вх.}n}^1 \text{ min}$ ) наблюдается скачкообразное изменение потребляемого тока. Объясняется такой факт тем, что в момент переключения оказываются открытыми как выходной транзистор, так и транзистор, включенный в коллекторную цепь. Величина тока при этом зависит от частоты следования входных импульсов – с увеличением частоты увеличивается бросок тока. Процесс измерения тока потребления на высокой частоте является достаточно сложным. Для устранения этого недостатка вводится контроль дополнительного параметра – тока короткого замыкания  $I_{\text{КЗ}}$ , т.е. контролируется ток, протекающий в выходной цепи при замыкании ее на «массу», и при закрытом выходном транзисторе. При выборе источников питания, обеспечивающих работу РЭС на ИМС ТТЛ-типа на высокой частоте, рекомендуется использовать неравенство:  $I_n^1 + I_{\text{КЗ}} > I_{\text{П}} (f = f_{\text{max}})$ , т.е. сумма двух измеренных токов должна быть больше тока потребления на максимальной частоте.

**Пример.** Требуется определить  $P_{\text{cp}}$  по данным рис. 9.15, если известно, что  $E_n = 5 \text{ В}$ .

Так как

$$P_{\text{cp}} = E_n [(I_n^0 + I_n^1)/2],$$

то

$$P_{\text{cp}} = 5[(4,2 + 1,3)/2] = 13,8 \text{ мВт}.$$

### Дополнительные параметры

При коммутации сложных цепей РЭС возможны случаи, когда на вход ИМС подается напряжение, равное напряжению питания. Для обеспечения работоспособности ИМС в случае  $U_{\text{вх}} = E_n$  вводится дополнительный контрольный параметр – ток входного пробивного напряжения  $I_{\text{вх.проб}}$  (см. рис. 9.13).

В электронных устройствах могут появляться помехи, искажающие информационные сигналы, в результате чего происходят ложные срабатывания ИМС. Амплитуда этих помех зависит от входных и выходных характеристик, а также от волнового сопротивления в электронных схемах РЭС. С целью уменьшения амплитуды колебаний в цепях ИМС используются ограничительные («антизвонные») диоды (например, диод VD на рис. 9.4).

Введение ограничительных диодов, в свою очередь, привело к изменению наклона входной характеристики ИМС в области  $U_{\text{ВХ}} < 0$  (см. рис. 9.13). Для контроля работоспособности ограничительных диодов измеряется напряжение  $U_{\text{д}}$  при известном входном токе  $I_{\text{вх.д}}$ .

## Методы контроля статистических и динамических параметров ИМС

Цифровые интегральные схемы предназначены для работы в РЭС в самых разнообразных условиях, в том числе и в наихудших. Поэтому, как правило, электрические параметры ИМС контролируются при режимах, соответствующих наихудшим условиям работы. Очевидно, что для каждой серии ИМС наихудшие условия будут различными.

Методы контроля электрических и временных параметров ИМС рассмотрим на примере транзисторно-транзисторной логики, выполняющей функцию «4И-НЕ» (см. рис. 9.4).

### *Измерение выходного напряжения логического нуля ( $U_{Вых}^0$ )*

Измерение  $U_{Вых}^0$  производится при одновременной подаче на все входы ИМС напряжения логической 1. При этом  $U_{ex.n \min}^1$  задается генератором напряжения ГН (рис. 9.16), минимальное напряжение питания – источником  $E_n$ , и величина тока  $U_{ВЫХ}^0$  – генератором тока ГТ. Эти условия являются наихудшими для контролируемого параметра  $U_{ВЫХ}^0$ .

Если хотя бы по одному входу напряжение логической 1 окажется недостаточным для открытия ИМС, то на выходе ИМС устанавливается напряжение, не соответствующее логическому 0: измеренная величина будет больше, чем  $U_{вых \max}^0$ , и ИМС будет забраковано по данному параметру.

### *Измерение выходного напряжения логической единицы $U_{вых}^1$*

Контроль параметра  $U_{вых}^1$  производится при вытекающем токе  $I_{ВЫХ}^1$  (см. рис. 11.16, б), задаваемом генератором тока ГТ при минимальном напряжении источника питания  $E_n$ . Включение режима логической единицы на выходе ИМС обеспечивается подачей на все ее входы напряжения, соответствующего логическому нулю. Однако помехоустойчивость ИМС в подобном случае полностью не гарантируется.

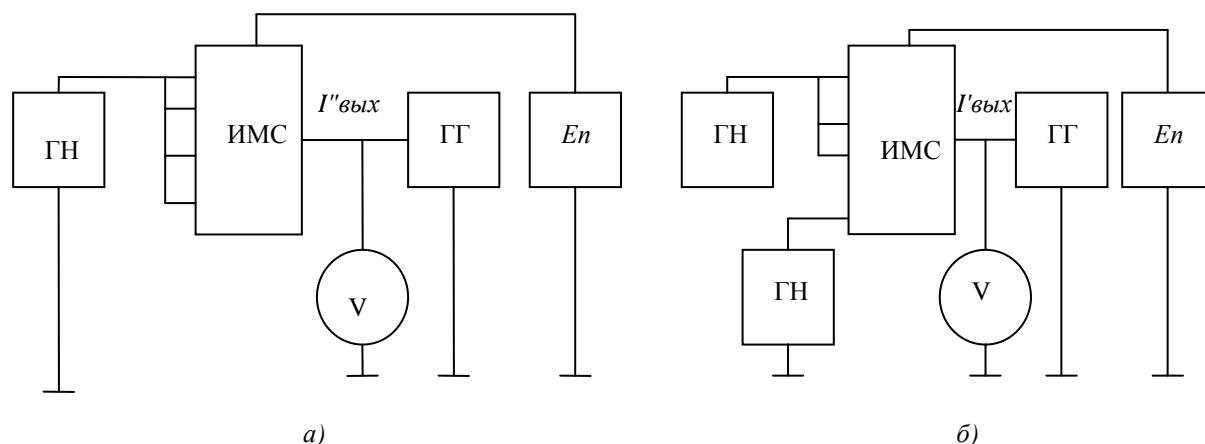


Рис. 9.16. Схемы измерения параметров  $U_{вых}^0$  (а) и  $U_{ВЫХ}^1$  (б)

Требуемая помехоустойчивость достигается подачей на один из входов интегральной схемы напряжения  $U_{ВХ}^0$  от генератора ГН1. На оставшиеся входы от генератора ГН2 подключается напряжение максимального значения логической 1. Выполнение заданной ИМС функции контролируется поочередным подключением входов к генератору ГН1, и при этом каждый раз необходимо измерять выходное напряжение.

#### *Измерение входного тока логического нуля ( $I_{вх}^0$ )*

Контроль параметра  $I_{вх}$  выполняется по схеме, показанной на рис. 9.17, а. К контролируемым входам ИМС поочередно подключается генератор ГН1, напряжение которого равно  $U_{Вых}$ , и измеряется ток, протекающий в цепи. Основные входы подключаются к генератору напряжения ГН2, на выходе которого установлено максимальное напряжение логической 1. Максимальное значение  $I_{ВХ} = \max$  (наихудший вариант) соответствует условию  $E_n = \max$ .

#### *Измерение входного тока логической единицы ( $I_{вх}^1$ ) и пробивного тока на входе схемы ( $I_{вх-проб}$ )*

Как и в предыдущем случае, контролируемый параметр определяется поочередно у каждого входа подключением генератора ГН (рис. 9.17, б), напряжение на выходе которого равно  $I'_{вых.n \min}$ , а для параметра  $I_{ВХ}$  – максимальному напряжению питания. Наихудший случай для параметров  $I_{вх}^1$ ,  $I_{ВХ-проб}$  обеспечивается заданием условия  $E_n = \max$ .

#### *Измерение тока короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) на выходе ИМС*

В этом случае выход ИМС и все входы замыкаются на «массу», а напряжение источника питания устанавливается равным  $E_n = \max$  (рис. 9.18).

#### *Измерение потребляемых ИМС токов ( $I_{ном}^0$ и $I_{ном}^1$ )*

Контроль токов потребления осуществляется на выходе ИМС в состояниях логического нуля и логической единицы (рис. 9.19). Состояние логического нуля обеспечивается подключением всех входов к генератору напряжения ГН, а состояние логической единицы – на «массу». При пороговом напряжении источника питания возникают наихудшие условия, когда измеренные значения параметров максимальны.

#### *Измерение динамических параметров ИМС*

Временные интервалы  $t_{3}^{10}$  и  $t_{3}^{01}$ , характеризующие быстродействие ИМС, измеряются с помощью двухлучевого осциллографа Р (рис. 9.20) с уровнями отчетов, показанными на диаграммах (см. рис. 9.10).

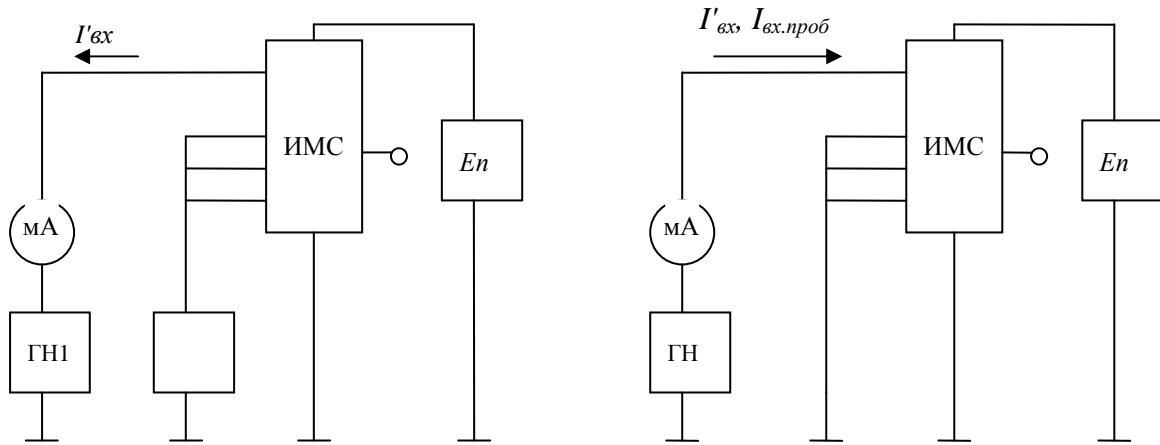


Рис. 9.17. Схемы измерения токов  $I'_{вх}$  (а),  $I^1_{вх}$ ,  $I_{вх.проб}$  (б)

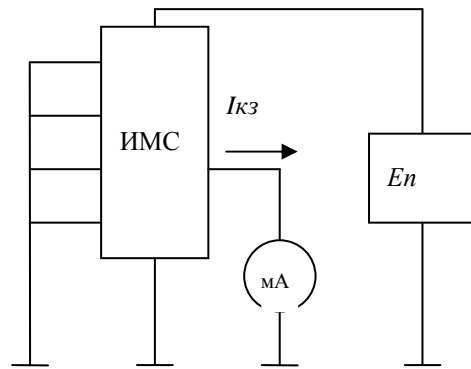


Рис. 9.18. Схема измерения тока короткого замыкания  $I_{кз}$

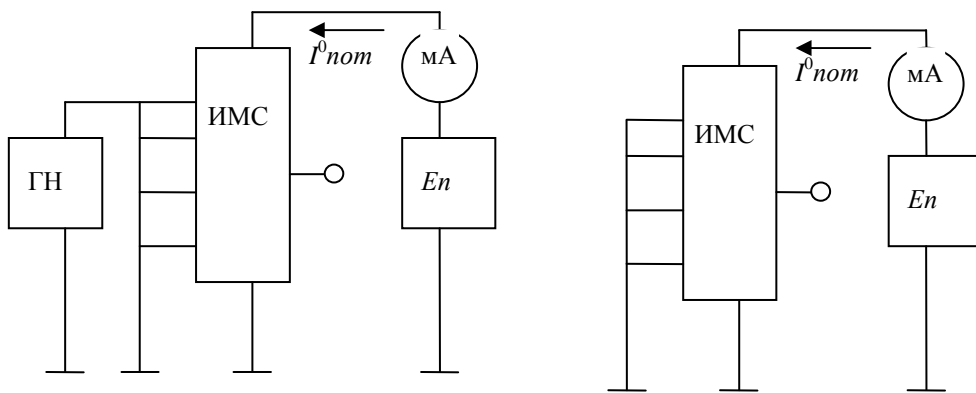


Рис. 9.19. Схема измерения тока  $I^0_{ном}$  (а),  $I^1_{ном}$  (б)

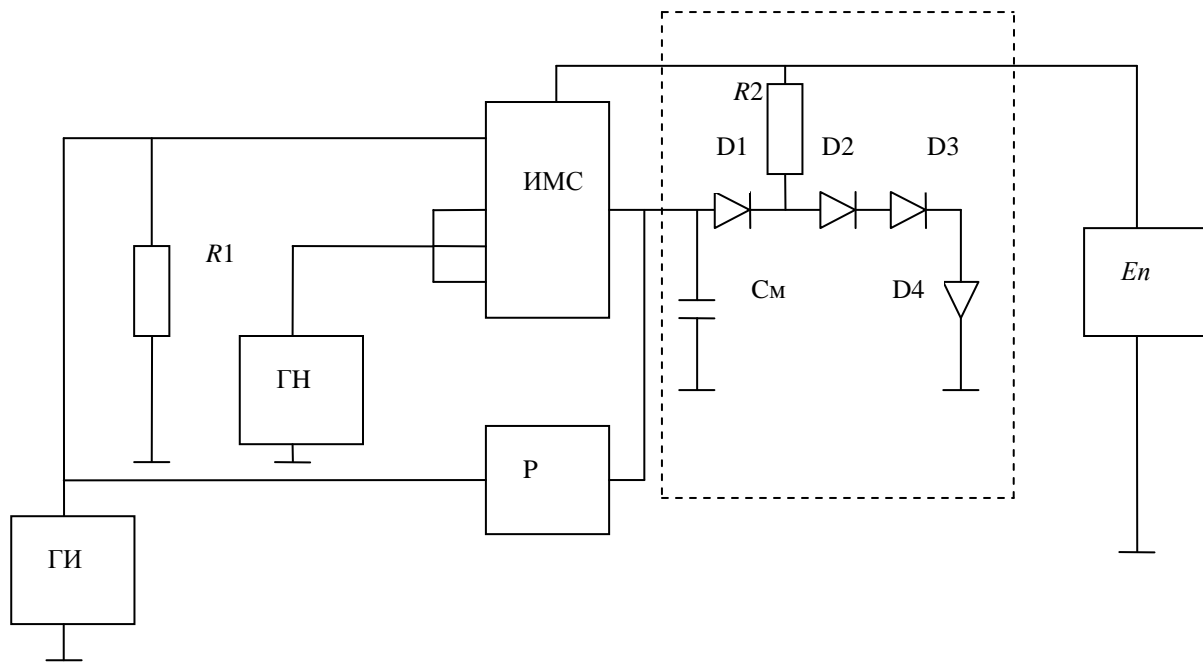


Рис. 9.20. Схема измерения динамических параметров ИМС

Генератор импульсов ГИ подключен к одному из входов ИМС. Резистор  $R1$  этой линии выполняет роль согласующего устройства. Выход ИМС содержит эквивалент нагрузки, параметры которой подобраны таким образом, чтобы приблизить условия к реальным условиям ее эксплуатации.

Входы, на которые в этом случае не подается сигнал от ГИ, подсоединяются к генератору напряжения ГН, значение которого устанавливается равным максимальному значению логической единицы.

Контролируемые параметры основных серий ЦИМС сведены в табл. 9.6.

Кроме перечисленных ранее контролируемых параметров ИМС, в табл. 9.6 указаны значения интервалов задержки распространения сигнала при включении  $T_{здр}^{10}$  и выключении  $T_{здр}^{01}$ . Там же приведены величины внутренних сопротивлений ИМС и пределы отклонения (в %) контролируемых параметров.

Кроме перечисленных ранее контролируемых параметров ИМС, в табл. 9.6 указаны значения интервалов задержки распространения сигнала при включении  $T^{10}$  и выключении  $T_{здр}^{01}$ . Там же приведены величины внутренних сопротивлений ИМС и пределы отклонения (в %) контролируемых параметров.

Таблица 9.6

## Контролируемые параметры основных серий ЦИМС

ЦИМС	ДТЛ К511ЛА3	ТТЛ130 К131ЛА3 четыре элемента 2И-НЕ	ТТЛ131 К155ЛА3 четыре элемента 2И-НЕ	ТТЛШ533 К555 три элемента 3И-НЕ	ТТЛШ530 К531ЛА4 три элемента 3И-НЕ	КМОП К176ЛА7 четыре элемента 2И-НЕ	КМОП К561ЛА9 три эле- мента 2И-НЕ	ЭСЛК500ЛМ102 четыре элемента 2И-НЕ и один элемент 2ИЛИ
$I_{ex}^0$ , МА	$\leq -0,48$	$\leq 2,3$	$\leq -1,6$	$\leq -0,4$	$\leq -2$	$\leq -10^{-3}$	$\leq -10^{-3}$	$\geq 5 \times 10^{-3}$
$I_{ex}^1$ , МА	$\leq 5 \times 10^{-3}$	$\leq 0,07$	$\leq 0,04$	$\leq 0,02$	$\leq 0,05$	$\leq -10^{-3}$	$\leq -10^{-3}$	$\leq (265 \div 500) \times 10^3$
$U_{вых}^0$ , В	$\leq 1,5$	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,3$	$\leq 2,9$	$\leq -(1,7 \div 1,9)$
$U_{вых}^1$ , В	$\geq 12$	$\geq 2,4$	$\geq 2,4$	$\geq 2,7$	$\geq 2,7$	$\geq 8,2$	$\geq 7,2$	$\geq -(0,8 \div 1)$
$I_{пот}^0$ , МА	$\leq 30$	–	$\leq 12$	$\leq 4,4$	$\leq 18$	$\leq 3 \times 10^{-3}$	$\leq 5 \times 10^{-3}$	$\leq 26$
$I_{пот}^1$ , МА	$\leq 10$	–	$\leq 8$	$\leq 1,6$	$\leq 8$	$\leq 3 \times 10^{-3}$	$< 5 \cdot 10^3$	$< 26$
$P_{потр}$ , мВт	$\leq 250$	$\leq 44$	$\leq 27$	$\leq 7,5$	$\leq 19$	$\approx 10^{-3}$	$\approx 10^{-5}$	$(3,44 \div 4,5)$
$R_H$ , кОм	$1 \pm 5\%$	$1 \pm 5\%$	$1 \pm 5\%$	$0,280 \pm 5\%$	$0,280 \pm 5\%$	$150 \pm 5\%$	$150 = 1 \pm 5\%$	$(30 \div 300) \pm 5\%$
$f$ , МГц	$\approx 0,100$	$\leq 30$	$\leq 10$	$\leq 15$	$\leq 50$	$\leq (3 \div 5)$	$\leq (3 \div 5)$	$\leq 200$
$T_{здр}^{10}$ , нс	$\leq 150$	$\leq 10$	$\leq 15$	$\leq 10$	$\leq 5$	$\leq 200$	$\leq 160$	$\leq 2,9$
$T_{здр}^{01}$ , нс	$\leq 400$	$\leq 10$	$\leq 22$	$\leq 10$	$\leq 5$	$\leq 200$	$\leq 160$	$\leq 2,9$
$U_{ин}$ , В	$15 \pm 10\%$	$5 \pm 5\%$	$5 \pm 5\%$	$5 \pm 5\%$	$5 \pm 5\%$	$9 \pm 5\%$	$(5 \div 10) \pm 5\%$	$-5,2 \pm 5\%$

## 11.4. Генератор тест-последовательности

Генератор тест-последовательности является одной из основных конструктивных сборочных единиц сигнатурного анализатора и предназначен для формирования  $(2^q - 1)$  циклически повторяющихся бит, где  $q$  – битовая длина. Тест-последовательность может включать в себя все возможные состояния с  $q$  битами, за исключением состояния с одними нулями.

Сигнатура (лат. signatura) переводится как «обозначать, указывать». Применительно к цифровым устройствам это двоичный индивидуальный код, позволяющий оценивать состояние («годен», «не годен») системы в целом или ее отдельных плат, регистров и т.п.

Метод сигнатурного анализа основан на контроле цифрового устройства циклическим избыточным кодом, который вырабатывается генератором псевдослучайной двоичной последовательности. Псевдослучайная двоичная последовательность (в дальнейшем для краткости написания бу-



дем называть ее «тест-последовательность») логических единиц и нулей выглядит как случайная, а на самом деле повторяется с некоторой периодичностью.

Принцип формирования двоичных контрольных кодов поясним на примере трехразрядного генератора тест-последовательности. Такой генератор (рис. 9.21) состоит из сумматора по модулю 2 и трех триггерных ячеек с входами  $D_i$  и  $C_i$  и выходами  $Q_i$  ( $i = 1, 3$ ), образующих сдвигающий регистр. От ячеек с выходами  $Q_i$  и  $Q_3$  имеются обратные связи на вход сумматора по модулю 2.

Прежде чем пояснять работу схемы генератора тест-последовательности, сделаем два примечания, связанных с функционированием ее элементов:

1. На выходе сумматора по модулю 2 логическая единица появляется только при разных битах на его входе. Одинаковым единицам и нулям на входе сумматора по модулю 2 на выходе соответствует нулевой бит.

2. Сдвигающие тактовые импульсы (СТИ) поступают одновременно на все триггеры регистра и выполняют роль синхроимпульсов. Если триггер  $i$ -той ячейки находится в положении 0 ( $Q_i = 0$ ), то тактовый импульс не воздействует на него. В противоположном случае, т.е. когда триггер находится в состоянии 1 ( $Q_i = 1$ ), тактовый импульс перебрасывает его в 0, в результате чего записывается 1 в триггер  $(i + 1)$  разряда.

Таким образом, каждый новый тактовый импульс продвигает единицу все дальше по направлению к выходу сдвигающего регистра. В реальных сигнатурных анализаторах на вход сумматора по модулю 2 подается еще поток данных ID от контролируемой цифровой системы. В отсутствии потока данных ID-генератор вырабатывает собственные циклические тест-последовательности, с помощью которых можно оценить его работоспособность. При рассмотрении принципа действия генератора тест-последовательности будем считать, что поток данных ID отсутствует.

Теперь снова вернемся к рис. 9.21 и предположим, что триггеры сдвигающего регистра находятся в следующих исходных состояниях:  $Q_1 = 0$ ;  $Q_2 = 1$ ;  $Q_3 = 0$ . Так как на входах сумматора по модулю 2 одинаковые (нулевые) сигналы, на входе D1 первого триггера также будет нулевой сигнал (табл. 9.7).

В начале первого тактового импульса на выходе  $Q_1$  остается логический нуль. Второй триггер, находящийся в состоянии единицы, перебрасывается в состояние нуля, а на входе  $D_3$  была единица, и третий триггер за время действия первого тактового импульса успевает переключиться в состояние единицы. В сдвигающем регистре образовался набор бит 001, из чего следует, что произошло смещение всех состояний вправо.

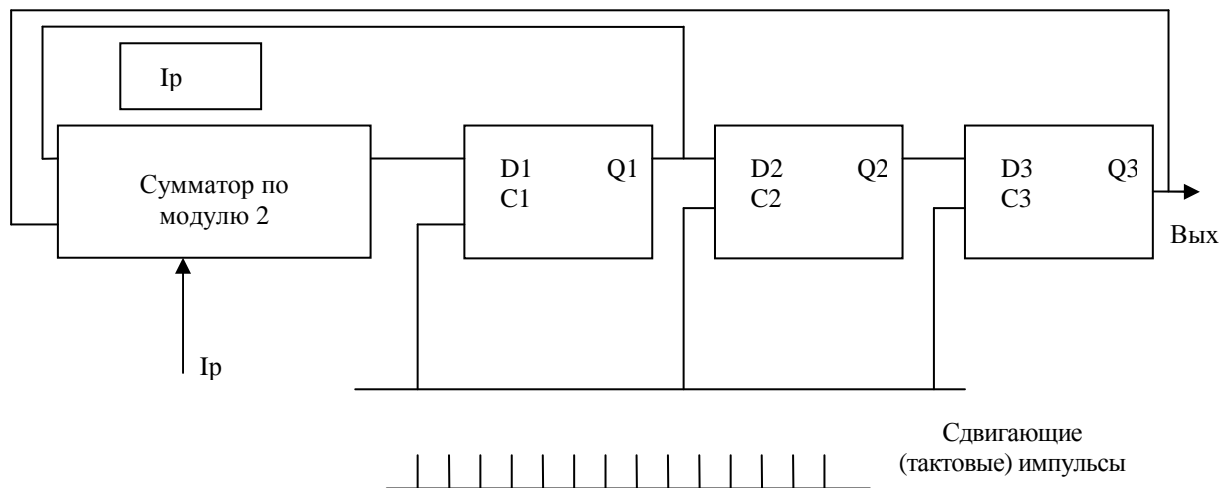


Рис. 9.21. Схема генератора тест-последовательности

Таблица 9.7

Таблица состояний элементов генератора тест-последовательности

СТН	D <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	
0	0	0	1	0	Исходное состояние
1	1	0	0	1	
2	1	1	0	0	Псевдослучайные последовательности
3	1	1	1	0	
4	0	1	1	1	
5	1	0	1	1	
6	0	1	0	1	
7	0	0	1	0	
8	0	0	0	1	

В конце первого тактового импульса один из входов сумматора по модулю 2 оказывается в состоянии логической единицы (выход  $Q_3 = 1$ ), и на входе  $D_1$  появится единичный сигнал. При втором тактовом импульсе эта единица поступит на выход  $Q$  первого триггера (в табл. 9.7 подобные переходы показаны стрелками), второй триггер остается в положении 0, а третий триггер  $Q_3$  переключится в нуль. В сдвигающем регистре окажется записанным слово 100.

После третьего импульса все ряды сдвигающего регистра перейдут в состояние логической единицы, а на выходе сумматора по модулю 2 появится логический нуль, который возникнет на выходе  $Q_1$  под действием четвертого импульса, и т.д.

Из сказанного следует, что при битовой длине  $q = 3$  имеет место генерация псевдослучайных последовательностей бит, состоящая из  $(2^3 - 1) = 7$

структур. Причем эта последовательность представляется как бы случайной, но повторяется с периодичностью в 7 тактовых импульсов.

Таким образом, двоичный код 001, появляющийся в регистре трехразрядного генератора тест-последовательности через 7 тактовых импульсов, можно принять за контрольное двоичное число, которое однозначно характеризует его исправное состояние.

В реальных сигнатурных анализаторах контрольное двоичное число-сигнатура формируется из 16-разрядного двоичного числа и выражается четырехзначным шестнадцатеричным кодом.

Логические анализаторы и анализаторы потока цифровых данных имеют более широкий диапазон разрядностей – от 8 до 64 и более, что объясняется спецификой их использования при оценке состояния сложных цифровых систем.

### 11.5. Структурная схема сигнатурного анализатора

Сигнатурный анализ сводится к сопоставлению реальной сигнатуры контролируемого цифрового устройства с образцовой сигнатурой, соответствующей работоспособному состоянию этого же устройства. Сигнатурные анализаторы предназначены, прежде всего, для поиска неисправностей в сложных цифровых устройствах, содержащих микропроцессоры.

Структурная схема сигнатурного анализатора представлена на рис. 9.22. В общем случае в сигнатурном анализаторе выполняются три основные операции – формирование тест-последовательности; формирование сигнатуры и отображение сигнатуры.

Длина тест-последовательности зависит от разрядности сдвигающего регистра сигнатурного анализатора и формируется следующим образом. Из контролируемого цифрового устройства через пробник (**трехканальный и данных**) в формирователи временных ворот и тест-последовательности поступают импульсы «Пуск», «Стоп» и «Тактовые», а также исследуемый набор бит-данных.

Временные ворота образуются фронтами импульсов «Пуск» и «Стоп» (рис. 9.23). В моменты совпадения фронтов тактовых импульсов с битами данных в диапазоне временных ворот, что показано вертикальными пунктирными линиями на рис. 9.23, происходит формирование тест-последовательности 1101001 (напомним, в реальном сигнатурном анализаторе эта тест-последовательность 16-разрядная). Тактовые импульсы одновременно синхронизируют работу всех конструктивных единиц анализатора.



Рис. 9.22. Структурная схема сигнатурного анализатора

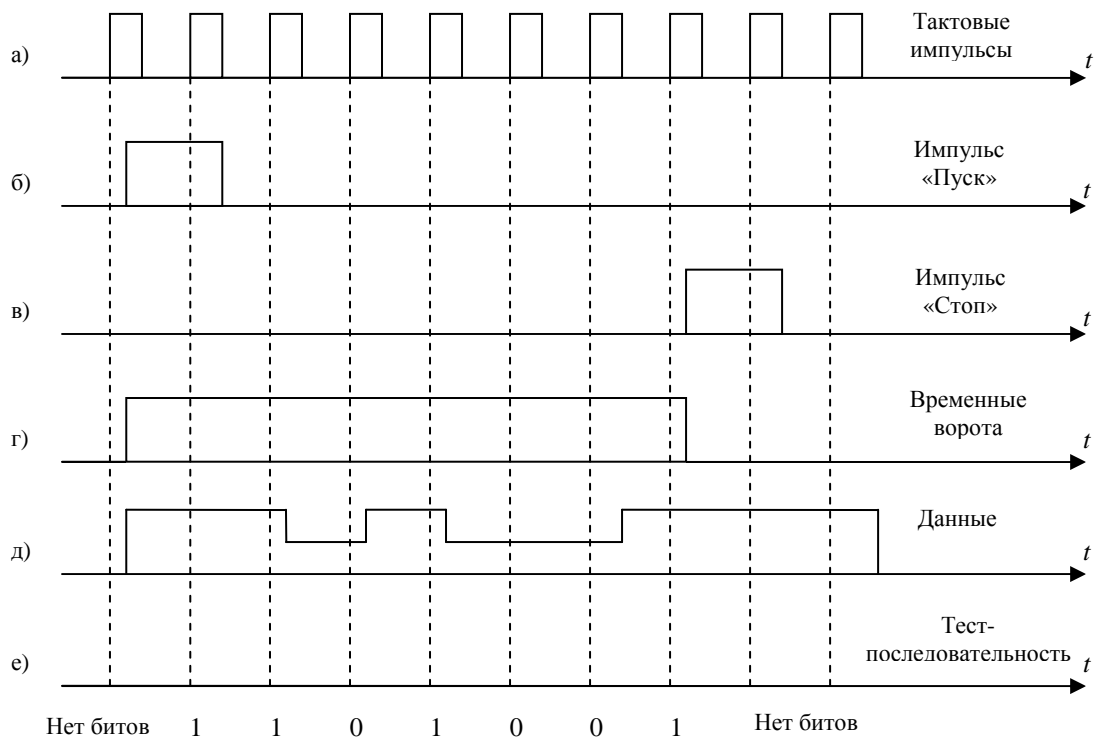


Рис. 9.23. Схема формирования тест-последовательности в сигнатурном анализаторе

К одному из входов формирователя двоичного кода сигнатуры подводится образованная тест-последовательность, а к другому – тактовые импульсы. Последовательность бит, определяющая сигнатуру (слово), далее следует в два блока памяти. Блок памяти 1 хранит слово в течение цикла испытания, а затем, после дешифратора, передает его на устройство отображения – дисплей. Преобразование 16-разрядного числа в четырехзначный шестнадцатеричный код-сигнатуру производится в дешифраторе.

В блоке памяти 2 хранятся 16-разрядные числа двух последовательных циклов испытаний, а затем эти числа сравниваются в компараторе. В случае несовпадения двоичных чисел на дисплей выдается информация о неисправном узле испытываемого устройства.

Сигнатурный анализатор можно использовать также в режиме однократного испытания, при котором специальной схемой формируется слово за время действия временных ворот. Предусмотрен и генератор самодиагностики, используемый при испытаниях отдельных цифровых устройств с относительно простой логикой.

### **11.6. Принцип формирования 16-разрядной сигнатуры**

Формирование 16-разрядной сигнатуры объясним на примере анализатора типа HP5005A фирмы «Хьюлетт Паккард» [38]. В состав анализатора входят 16-разрядный регистр сдвига и четыре последовательно включенных сумматора по модулю 2 (рис. 9.24).

Точки ответвлений цепей обратных связей в разрядах 7, 9, 12 и 16 регистра сдвига выбраны таким образом, чтобы обеспечить возможно больший разброс пропущенных ошибок. При этом ответвлений от разрядов 4 или 8 стараются избегать, так как большинство цифровых систем с шинной организацией повторяют структуры с интервалами указанных разрядов. Два входа регистра сдвига обозначены буквами D (от англ. Data – данные) и C (от англ. Clock – тактирование). Первый вход предназначен для ввода в регистр тест-последовательности – данных. На второй вход поступают тактовые импульсы с максимальной частотой 25 МГц при минимальной длительности импульса 15 нс в состояниях с высоким или низким уровнем напряжения.

Входом сигнатурного анализатора служит вход первого сумматора по модулю 2, на который подается двоичная тест-последовательность от испытываемой цифровой системы. Эта входная последовательность может быть любой длины, но в конце цикла анализируется только 16-битовое число, зафиксированное в регистре сдвига. Подобную операцию называют сжатием исследуемой информации.

Используемый в сигнатурном анализаторе шестнадцатеричный код частично видоизменен по сравнению с обычным кодом 0123456789ABCDEF и записывается в таком виде: 0123456789ACFHPV. Как видно, изменения в коде касаются только буквенной части: все буквы, кроме А (10), либо заменены, либо расположены в ином порядке. Дело в том, что при использовании обычного шестнадцатеричного кода можно перепутать на экране дисплея изображение буквы В и цифры 8 или буквы D и цифры 0 и т.п.

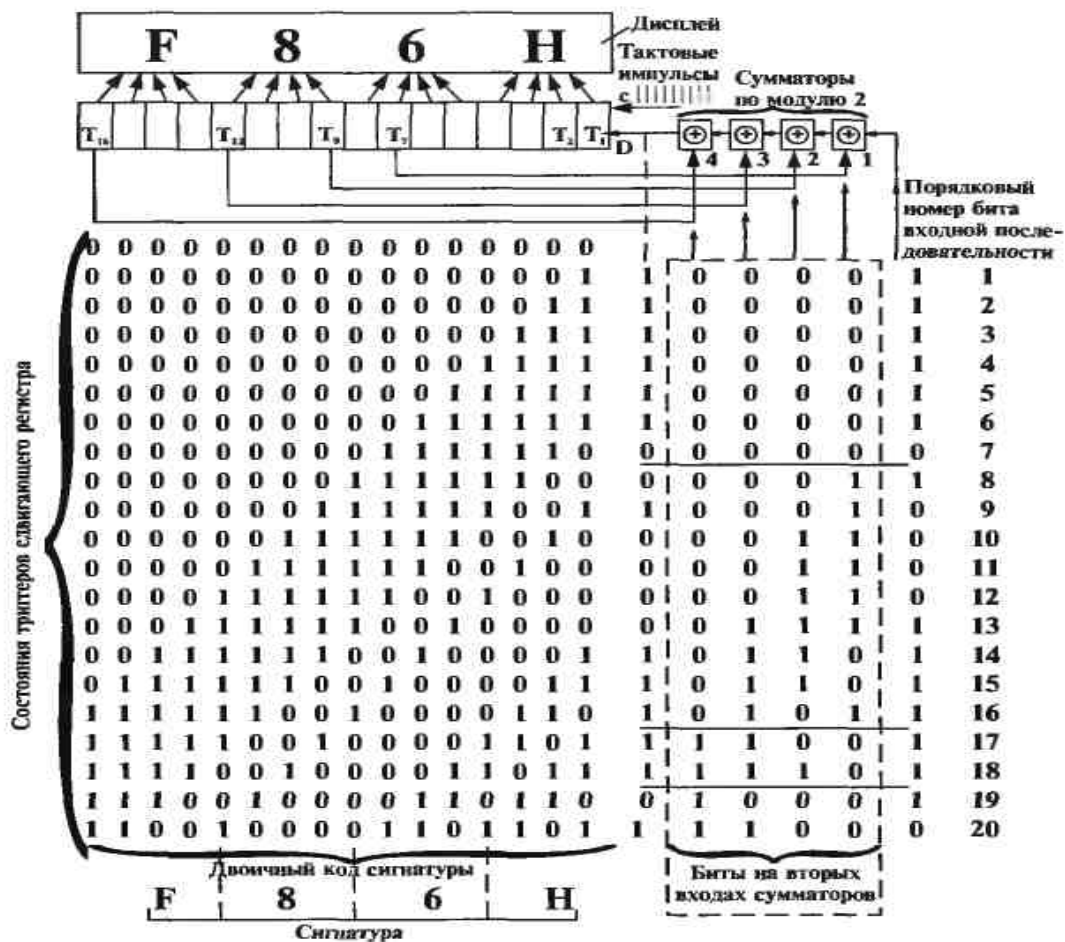


Рис. 9.24. Схема формирования 16-разрядной сигнатуры

Формируется 16-разрядная сигнатура в анализаторе следующим образом. Допустим, что на первые входы сумматоров по модулю 2 подается двоичная тест-последовательность из 20 бит в таком порядке: 111111010000111 1 1 1 1 0, т.е. с номера бита первого (1) по двадцатый (0). На вторые входы сумматоров по модулю 2 подключены цепи обратных связей от  $T_7, T_9, T_{12}$  и  $T_{16}$  разрядов регистра. Биты на вторых входах сумматоров на рис. 9.23 обведены пунктирной линией.

Работа четырехзвеньевого сумматора по модулю 2 связана с рядом известных закономерностей:

- если на вторых входах всех четырех сумматоров бит 0 или у четного числа сумматоров бит 1, то бит, поданный на вход сумматоров, передается на вход D регистра без изменения. Например, первые семь единичных битов входной тест-последовательности при нулевых битах на вторых входах сумматоров передаются без изменения на вход D регистра сдвига;
- если бит 1 имеется на вторых входах нечетного числа сумматоров, то на входе D регистра получается бит, противоположный входному биту. Например, единичный бит входной тест-последовательности №16 на выходе схемы сумматоров становится нулевым.

Исходное состояние сигнатурного анализатора – все триггеры 16-разрядного регистра находятся в состоянии 0. Поступивший на вход регистра С тактовый импульс вводит в триггер  $T_1$  первый единичный бит тест-последовательности, имеющийся на входе D. Второй тактовый импульс сдвигает первый бит на одну ячейку влево – из триггера  $T_1$  в триггер  $T_2$  и вводит в триггер  $T_1$  второй бит тест-последовательности. Каждый очередной тактовый импульс сдвигает содержимое регистра влево еще на одну ячейку и вводит в триггер T следующий бит.

Процедура сдвига регистра продолжается до тех пор, пока в триггер T войдет последний (в нашем случае 20-й) бит тест-последовательности, прошедший через схему сумматоров по модулю 2. Число – слово, выраженное в шестнадцатеричном коде и разделенное на четыре слога вида F86H, представляет собой сигнатуру входной (испытываемой) тест-последовательности.

Повторение тест-последовательности в течение следующих 20 тактовых импульсов приведет к образованию точно такой же сигнатуры F86H. Можно показать, что изменение входной тест-последовательности всего на один бит (появление какой-либо неисправности или сбоя) дает совсем другую сигнатуру. Результаты испытания отображаются на дисплее сигнатурного анализатора.

Нахождение и сравнение многочисленных сигнатур изложенным методом требует значительных трудозатрат и времени. Эта процедура зависит также от длины исследуемой тест-последовательности: чем она длиннее, тем больше разнообразных сигнатур можно сформировать из нее. В настоящее время ведутся исследования по формализации задачи получения сигнатур программным путем с помощью ЭВМ. При этом используется правило, согласно которому данной тест-последовательности ставится в соответствие определенная сигнатура.

Зависимость между двоичными последовательностями на выходе и входе схемы сумматора по модулю 2 определяется с учетом следующих условий. Предполагается, что входная последовательность состоит из  $n$  битов:  $a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{n-1}, a_n$ , где  $a_i$  – либо 1, либо 0. Выходная последовательность после схемы сумматоров по модулю 2 также содержит  $n$  битов (единичных и нулевых):  $b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n$ . Как следует из рис. 9.24, первые семь битов входной и выходной последовательностей одинаковы, т.е.  $b_1 = a_1, b_2 = a_2, \dots, b_7 = a_7$ . Начиная с восьмого значения 1-го бита (1 или 0) при условии  $8 < i < n$  определяется зависимостями

$$b_i = \begin{cases} a_i \oplus b_{i-16} \oplus b_{i-12} \oplus b_{i-9} \oplus b_{i-7} = 0; \\ \overline{a_i \oplus b_{i-16} \oplus b_{i-12} \oplus b_{i-9} \oplus b_{i-7}} = 1, \end{cases} \quad (9.13)$$

где  $\overline{a_i}$  – бит, противоположный биту  $a_i$ ; знак  $\oplus$  – суммирование по модулю 2.

Если в индексе бита  $b_{i-k}$  (9.13) получается отрицательное число ( $i < k$ ) или нуль ( $i = k$ ), то такой бит отбрасывается. Этот вывод подтвердим численными примерами. Допустим, что требуется определить биты  $b_i$  с индексами  $i = 14, 12$  и  $9$ .

Когда  $i = 14, i - 16 = -2; i - 12 = 2; i - 9 = 5; i - 7 = 7$ . Формула бита  $b_{14}$  имеет вид

$$b_{14} = \begin{cases} a_{14} \oplus b_2 \oplus b_5 \oplus b_7 = 0; \\ \overline{a_{14} \oplus b_2 \oplus b_5 \oplus b_7} = 1. \end{cases} \quad (9.14)$$

В случае, когда  $i = 12, i - 16 = -4; i - 12 = 0; i - 9 = 3; i - 7 = 5$ .

Тогда

$$b_{12} = \begin{cases} a_{12} \oplus b_3 \oplus b_5 = 0; \\ \overline{a_{12} \oplus b_3 \oplus b_5} = 1. \end{cases} \quad (9.15)$$

Соответственно при  $i = 9$

$$b_9 = \begin{cases} a_9 \oplus b_2 = 0; \\ \overline{a_9 \oplus b_2} = 1. \end{cases} \quad (9.16)$$

Таким образом, чтобы получить двоичный код сигнатуры, необходимо в выходной последовательности  $b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n$  «отсечь» первые  $n-16$  битов. Оставшиеся 16 битов и представляют собой сигнатуру входной (испытываемой) последовательности  $a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n$ .



Сигнатуру, приведенную на рис. 9.24, можно определить по данной методике, используя формулу (9.13), а результат записать в следующем виде.

№бита	1 2 3 4	5 6 7 8	9 10 11 12	13 14 15 16	17 18 19 20
$a_i$	1 1 1 1	1 1 0 1	0 0 0 0	1 1 1 1	1 1 1 0
$b_n$	1 1 1 1	1 1 0 0	1 0 0 0	0 1 1 0	1 1 0 1
		F = 12	8	6	H = 13

После «отсечения» первых четырех битов  $b_i$  ( $i = 1,4$ ), что показано пунктирной линией (см. рис. 9.23), оставшаяся двоичная последовательность  $b_5, b_6, \dots, b_{19}, b_{20}$  в шестнадцатеричном коде имеет вид F86H.

### 9.7. Обнаружение ошибок сигнатурного анализа

Появление ошибок в сигнатуре возможно по причине сбоев в тест-последовательности или изменения ее длины. Минимальная ошибка, которая должна обнаруживаться в процессе тестирования, равна одному биту. Рассмотрим один из методов оценки вероятности обнаружения ошибки в тест-последовательности сигнатурного анализатора. Для реализации этого метода необходимо иметь данные о битовой длине исследуемой тест-последовательности  $P$  и разрядности регистра сдвига  $q$ . При известных  $P$  и  $q$  вероятность обнаружения ошибки  $P_{ош}$  в тест-последовательности определяют по формуле

$$P_{ош} = [1 - k(p - q)(2^{p-q} - 1)(2^p - 1)], \quad (11.15)$$

где  $k$  – константа, при которой  $P_{ош} = 1,0$ , если  $p < q$ , поскольку в этом случае все входные данные попадают в регистр сдвига и обеспечивается обнаружение ошибки. Одна ошибка в тест-последовательности определяется с вероятностью  $p = 1,0$ , т.к. отсутствуют другие ошибки, которые могли бы отменить сигналы обратных связей. При наличии двух ошибок в тест-последовательности возможно появление событий, когда последующая ошибка нивелирует действие предыдущей ошибки так, что обе ошибки не будут обнаружены. Вероятность обнаружения многократных (две и более) ошибок определяется из равенства.

$$P_{ош} = 1 - 2^{-q}, \quad (11.16)$$

или в процентах

$$P_{ош} = (1 - 2^{-q}) \cdot 100. \quad (11.17)$$

Если в анализаторе используется 16-разрядный регистр сдвига, то вероятность обнаружения многократных ошибок достаточно большая, т.е.

$$P_{ош} = 1 - 2^{-16} = 0,99988 \text{ или } 99,998 \%,$$

для практических целей ее можно принимать равной единице.

В сигнатурных анализаторах для обнаружения ошибок в двоичных последовательностях применяют схемы сумматоров по модулю 2. Производятся подобные контрольные операции следующим образом. Допустим, что имеются две абсолютно одинаковые 16-разрядные двоичные последовательности. Одна получена в результате сигнатурного анализа испытываемой тест-последовательности, а другая – из ПЗУ. Суммирование по модулю 2 указанных последовательностей с учетом правила – безошибочно переданные биты обозначаются нулем, а биты ошибки – единицей дает нулевую последовательность ошибок. Интересующие нас три последовательности запишем в следующем виде.

№ бита	1 2 3 4	5 6 7 8	9 10 11 12	13 14 15 16
Послед 1	1 1 0 1	1 1 0 0	1 0 1 0	1 1 0 1
Послед 2	1 1 0 1	1 1 0 0	1 0 1 0	1 1 0 1
Ошибок	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
Структура	0	0	0	0

В данном случае сигнатура последовательности ошибок выражается четырьмя нулями. А теперь будем считать, что биты в разрядах 7 и 12 переданы с ошибками, т.е.

№ бита	1 2 3 4	5 6 7 8	9 10 11 12	13 14 15 16
Послед 1	1 1 0 1	1 1 1 0	1 0 1 1	1 1 0 1
Послед 2	1 1 0 1	1 1 0 0	1 0 1 0	1 1 0 1
Ошибок	0 0 0 0	0 1 0 0	0 0 1 0	0 0 0 0
Структура	0	2	1	0

Полученная сигнатура последовательности ошибок 0210 позволяет однозначно определить, в каких разрядах регистра сдвига произошли сбои передачи информации. В заключение следует отметить, что тестирование, основанное на методе сигнатурного анализа, характеризуется высокой достоверностью получаемых результатов.

### 11.8. Особенности применения сигнатуры анализаторов

Тестирование цифровых устройств с использованием цифровых анализаторов имеет ряд характерных особенностей, обусловленных, главным образом, сервисным обслуживанием микропроцессорных систем. При этом

процесс тестирования должен предусматривать выполнение следующих дополнительных операций и условий:

- приведение тестируемых схем в исходное состояние;
- автономная проверка работоспособности микропроцессора совместно с генератором тактовых импульсов;
- коммутация, в соответствии с программой тестирования, местных цепей обратных связей;
- возможность проверки узлов тестируемой схемы в обратном порядке до обнаружения узла с правильными входными, но ошибочными выходными кодами бит;
- обеспечение стабильности тест-последовательности в пределах заданных временных ворот;
- наличие образцовых сигнатур (документированных или записанных в ПЗУ) для испытываемых узлов.

В принципе возможны два режима сигнатурного анализа микропроцессорных систем – автоматический и программно управляемый. Первый режим предусматривает такое функционирование микропроцессора, при котором он циклически проходит все поле адресов, а на отключенные входы шины данных подается команда INCREMENT. Содержимое счетчика команд увеличивается на единицу. Далее микропроцессор вновь обращается к входу шины данных, и поскольку сохраняется та же команда, то число в счетчике команд снова увеличивается на единицу и т.д. Сигналы ПУСК и СТОП получают от адресной шины, используя линию старшего разряда адреса, а таковыми сигналами служат тактовые импульсы на входе микропроцессора. Роль тактовых импульсов также выполняют сигналы микропроцессора СИНХРОНИЗАЦИЯ.

В программно управляемом режиме тестирования применяется стимулирующая программа, записанная в ПЗУ микропроцессора. Эта программа позволяет генерировать сигналы пуска и останова, а также записывать повторяющиеся потоки информации через шину данных для тестирования узлов, соединенных с микропроцессором. Такой режим достаточно эффективен и охватывает большинство схем испытываемого цифрового устройства. Сочетание обоих режимов позволяет сделать процесс тестирования еще более полным и эффективным.

Процедура тестирования и диагностики микропроцессорной системы включает в себя большое число разнообразных операций. Ранее уже указывалось, что сигнатурный анализ применим к тем устройствам, которые подготовлены к нему в аппаратном и программном плане еще на стадии

проектирования. Некоторые цифровые устройства вообще не удается приспособить к сигнатурному анализу из-за малой емкости ПЗУ, отводимой для программной диагностики. В подобных случаях более целесообразно применять портативные многофункциональные тестеры для цифровых устройств. Тестер прост по устройству и позволяет контролировать цифровыми методами параметры сигналов в процессе отыскивания неисправностей (напряжения, токи, тактовую частоту, интервалы времени, уровни логических единиц, нулей и т.п.).

### **11.9. Метод логического анализа**

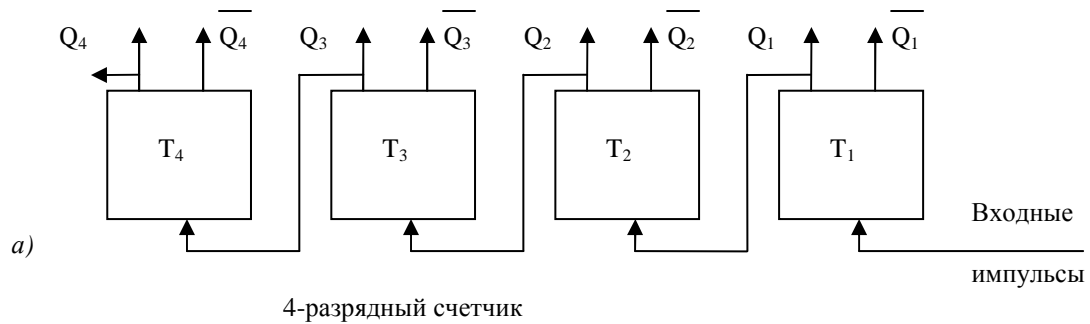
В отличие от сигнатурных анализаторов, используемых в основном в процессах поиска неисправностей в цифровых устройствах, логические анализаторы предназначены для решения более сложных задач оценки программного обеспечения. Различают три вида устройств, с помощью которых выполняют логический анализ – анализаторы логических состояний (АЛС); анализаторы логических временных диаграмм (АВД) и анализаторы потока цифровых данных (АТТД).

Как известно, комбинация единиц и нулей на выходах цифровой схемы определяет ее логическое состояние. Логические состояния какого-либо цифрового устройства можно отобразить в виде таблицы чисел (таблицы истинности) или в виде временной диаграммы на экране ЭЛТ. В качестве примера на рис. 9.25 показана схема 4-разрядного двоичного счетчика, его таблица истинности и временная диаграмма. Счетчик может иметь 16 логических состояний, определяемых логическими уровнями на входах всех 4-х триггеров. Если синхронизировать подачу входных импульсов с моментами съема информации с выходов триггеров, то можно по таблице истинности или временной диаграмме определить правильность функционирования счетчика.

В микропроцессорных системах передаваемые по шине данных или по адресной шине адреса представляют собой последовательности логических состояний. Однако в ряде случаев при анализе работы цифрового устройства, отыскании места неисправности более целесообразным оказывается представление данных в виде временной диаграммы.

Дело в том, что искажения фронтов и срезов импульсов, смещения моментов переключения триггеров могут служить причиной получения неправильных результатов. Принцип работы логических анализаторов заключается в том, что изменения логических состояний в испытываемых узлах, переход из одного логического состояния в другое под воздействием

внешних сигналов записывают в память анализатора, а затем воспроизводят на дисплее в виде, удобном для оценки и анализа полученной информации. В АЛС данные в память заносятся синхронно с изменением логического состояния испытываемого узла, в АВД – асинхронно. Поэтому АЛС называют синхронными, а АВД – асинхронными логическими анализаторами.



b)

Логическое состояние	Q4	Q3	Q2	Q1
Исходное нулевое	0	0	0	0
После 1-го импульса	0	0	0	1
После 2-го импульса	0	0	1	0
После 3-го импульса	0	0	1	1
После 4-го импульса	0	1	0	0
После 14-го импульса	1	1	1	0
После 15-го импульса	1	1	1	1

Таблица истинности

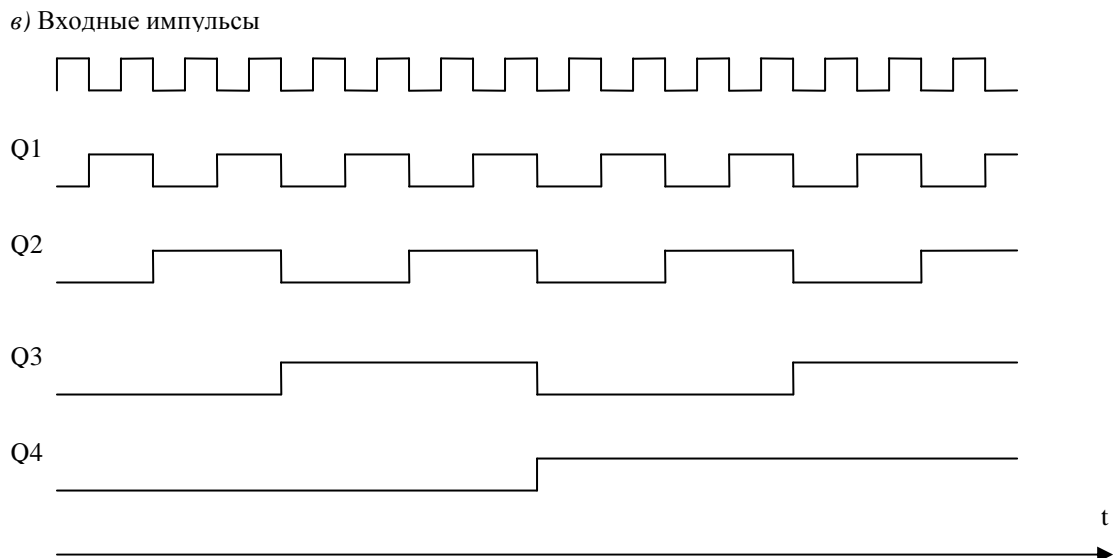


Рис. 9.25. Схема (а) 4-разрядного счетчика; таблица истинности (б); временная диаграмма (в)

При выборе логического анализатора необходимо учитывать его многоканальность, быстродействие, глубину памяти, способ запуска и другие технические характеристики. Число каналов в логических анализаторах практически ограничивается лишь емкостью внутренней памяти и габаритными размерами дисплея. Например, в настоящее время используются 8-, 12-, 16-, 32-, 48-, 64- и даже 104-канальные логические анализаторы. Большое число каналов требуется при тестировании плат памяти, интерфейсных плат и различных микропроцессорных устройств. Даже для тестирования 8-разрядного микропроцессора, имеющего 16-разрядную адресную шину, 8-разрядную шину данных и ряд других линий, следует выбрать не менее чем 32-канальный анализатор.

Быстродействие логического анализатора должно быть выше быстродействия (тактовой частоты) испытываемого цифрового устройства. Большинство АЛС имеет быстродействие 20 – 200 МГц, что вполне достаточно для тестирования узлов современной микропроцессорной техники. Чтобы избежать потерь информации в АД, необходимо запись в память вести с частотой, превышающей в 5 – 6 раз тактовую частоту испытываемого узла. Поэтому отдельные шины АД обладают максимальным быстродействием до 660 МГц. Кроме того, глубина памяти для полного воспроизведения временной диаграммы у АД должна быть больше, чем у АЛС: у АЛС она составляет 64 или 128 бит, а у АД доходит до 2048 бит на канал.

Чаще всего АД используют на этапе проектирования и отладки аппаратных средств, так как с их помощью можно определить временные задержки между каналами и паразитные импульсы между тактовыми импульсами. Более удобен АЛС при оценке синхронной работы всего комплекта цифрового устройства и отладке математического обеспечения (любую часть программы можно отобразить на дисплее в требуемом двоичном коде).

Самым простым способом запуска логического анализатора является комбинационный – запуск по параллельному коду слова. Запускающее слово выбирается таким образом, чтобы оно было единственным в последовательности бит данных. Для определения момента запуска в анализаторе имеется компаратор кодов, который сравнивает код приходящей информации с кодом, введенным в анализатор оператором. Длина запускающего слова определяется числом входных каналов логического анализатора.

При совпадении кодов вырабатывается сигнал запуска и начинается запись информации во внутреннюю память анализатора. Некоторые анализаторы имеют возможность запуска при последовательном совпадении нескольких параллельных слов с заданными значениями.

## 11.10. Структурная схема анализатора логических состояний

Анализатор логических состояний (АЛС), структурная схема которого показана на рис. 9.26, предназначен для сравнения 16-разрядных двоичных последовательностей (слов), поступающих от объекта испытания и с клавиатуры ввода. Синхронность функционирования всех узлов испытываемого устройства и АЛС обеспечивается тактовыми импульсами (ТИ).

После включения АЛС с выходов формирователя управляющего сигнала и делителя частоты  $f/15$  на входы 1 и 2 логического элемента  $U_1$  подаются единичные сигналы, в результате чего появляется разрешающий сигнал на входе 1 логического элемента  $U_2$ . С помощью клавиатуры ввода оператор набирает 16-разрядное слово, соответствующее работоспособному состоянию испытываемой схемы. Анализатор готов к работе. Биты анализируемого слова приходят одновременно (параллельно) на первые входы компараторов с 0-го на 15-й.

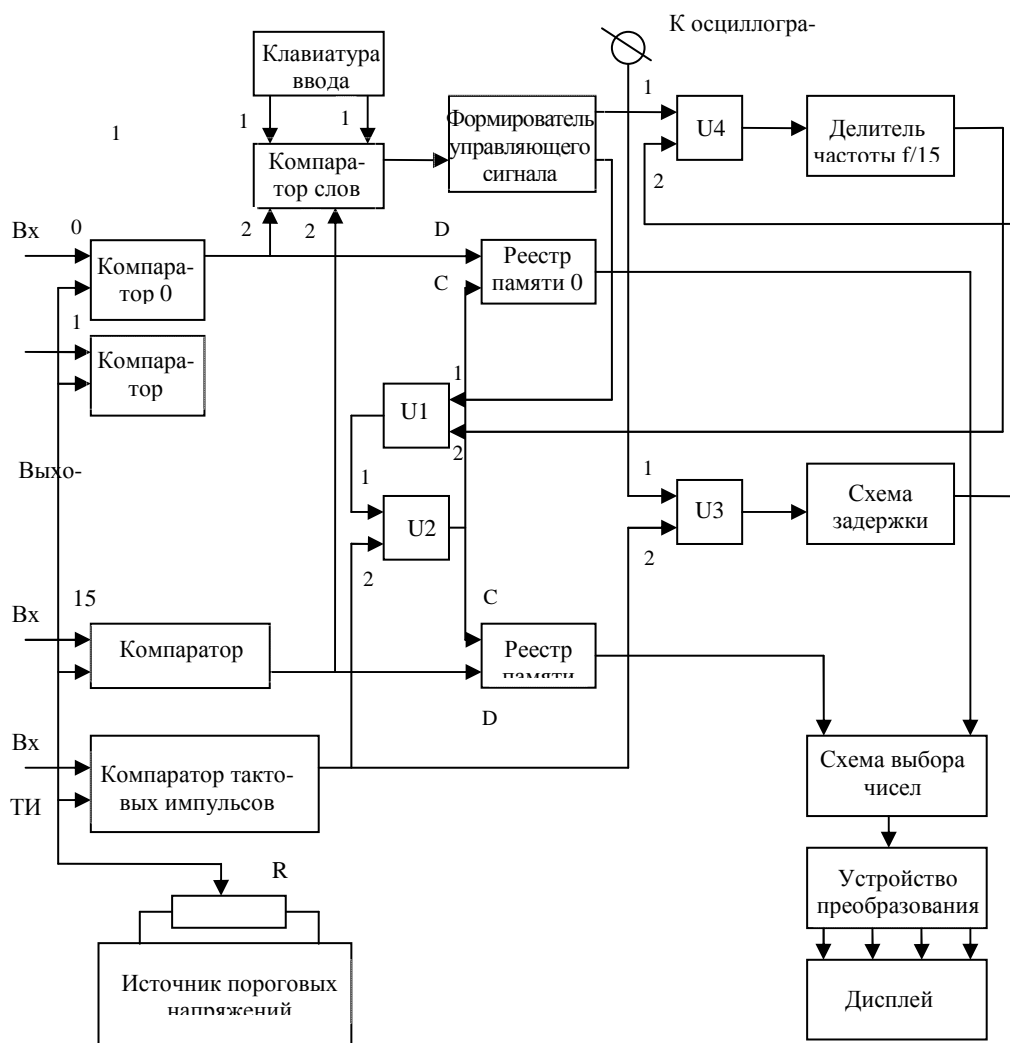


Рис. 9.26. Структурная схема анализатора логических состояний

Ко вторым входам компараторов подключается источник пороговых уровней напряжений логических единиц и нулей. С выходов компараторов биты слова поступают на входы 2 компаратора слов и клеммы D регистров памяти.

Необходимо отметить, что делитель частоты  $f/15$  и цифровая схема задержки функционируют в импульсном режиме только при прохождении единичных сигналов через логические элементы  $U_3$  и  $U_4$ . При нулевых входных сигналах делитель частоты  $f/15$  удерживает единичный сигнал на клемме 2 логического элемента  $U_1$ , а цифровая схема задержки – нулевой сигнал на клемме 2 логического элемента  $U_4$ .

Если анализируемое слово совпадает с набранным, на выходе компаратора слов появляется импульс, запускающий формирователь управляющего сигнала. Последний вырабатывает строб-импульс, который с выхода 1 поступает на входы 1 логических элементов  $U_3$  и  $U_4$ . Создаются условия для прохождения тактовых импульсов через элемент на вход цифровой схемы задержки, а также импульсов с ее выхода через элемент  $U_4$  в делитель частоты  $f/15$ .

Таким образом, в момент совпадения слов анализируемое слово окажется еще зафиксированным в регистрах памяти, а цифровая схема задержки и делитель частоты  $f/15$  начнут работать в импульсном режиме. По истечении 15 тактовых импульсов в регистре памяти окажется записанным 16 одинаковых слов и на выходе делителя частоты  $f/15$  возникнет нулевой сигнал, способствующий запираению элементов  $U_1$  и  $U_2$  и прекращению записи слов в регистры памяти.

Содержание регистров памяти с помощью схемы выборки передается через устройство преобразования на дисплей. Результаты сравнения отображаются на дисплее в виде таблицы битов, состоящей из 16 горизонтально расположенных слов. Самым верхним (начальным) словом является набранное слово. По этой причине такой режим работы АЛС называют режимом НАЧАЛО. Биты таблицы группируются в блоки в зависимости от формата отображения информации: по три (в восьмеричном формате) или по четыре (в шестнадцатеричном или двоично-десятичном формате) бита в строке. Каждые четыре строки, с целью упрощения считывания информации, разделяются также просветом.

При несовпадении слов на входах 1 и 2 компаратора слов в памяти АЛС производится непрерывное стирание и запись информации до тех пор, пока слова совпадут. В этом случае набранное слово в таблице бит



окажется последним (конечным), а подобный режим работы АЛС называют режимом КОНЕЦ.

После рассмотрения принципа действия АЛС может показаться, что тестирование цифровых систем не представляет особых трудностей. На самом деле эта процедура достаточно сложна и продолжительна – для анализа получаемой информации требуются специалисты высокой квалификации, хорошо знающие конструктивные особенности тестируемых цифровых устройств. В настоящее время АЛС применяются в основном при лабораторных испытаниях и отладке цифровых счетчиков, регистров, АЦП, ОЗУ, ПЗУ, преобразователей, печатных плат и других элементов цифровой техники. Для тестирования сложных микропроцессорных систем с шинной организацией разработаны специальные анализаторы потока цифровых данных.

### **9.11. Анализатор потока цифровых данных**

Анализаторы потока цифровых данных (АПД) позволяют наблюдать на дисплее и анализировать логические состояния на шинах данных, адресов и управления тестируемых цифровых систем. Программы тестирования, выполняемые микропроцессором, имеют многочисленные ветвления и циклы. По желанию пользователь может выбирать начало захвата данных в определенной точке программы, анализировать правильность ее выполнения и сопоставлять получаемые результаты с ожидаемыми. Предусмотрены также режимы последовательного запуска, выборочного сбора данных, перезапуска и подсчета числа состояний. Из изложенного следует, что АПД – более совершенное устройство тестирования, чем АЛС.

Функциональная схема 32-канального АПД представлена на рис. 9.27. Анализируемая двоичная последовательность данных поступает из объекта испытания в виде параллельных битов на первые входы компараторов. Как и в схеме АЛС (см. рис. 9.26), ко вторым входам компараторов подводятся пороговые уровни напряжения логических единиц и нулей. В цифровом компараторе слов происходит сравнение исследуемого и набранного на клавиатуре слов.

В АПД возможно использование программ, с помощью которых анализируется не все слово, а только определенная для просмотра область последовательности бит. Условия просмотра задаются кодовыми комбинациями – словами состояний, вводимыми в цифровые компараторы слов.

Имеются два вида слов состояний – состояния запуска и выборочные состояния. К первым относятся слова, которые появляются на входах анализатора в известном порядке и образуют траекторию потока данных. Вторые – это слова, выделяемые из потока данных и записываемые в запоминающее устройство (ЗУ) собранных данных.

В случае совпадения анализируемого слова с ожидаемым срабатывает схема захвата  $i$ -того состояния, и такое событие фиксируется в ЗУ числа повторов. Когда число повторов станет равным заданному, происходит изменение ячейки ЗУ собранных данных. Количество записанных слов состояний запоминается в ЗУ состояний.

Изменения в последовательности выполнения программ тестирования информации на дисплее осуществляются автоматически по командам из ОЗУ или через клавиатуру ввода пользователем. Информация на дисплее может быть представлена в двоичном, двоично-десятичном, восьмеричном и шестнадцатеричном форматах.

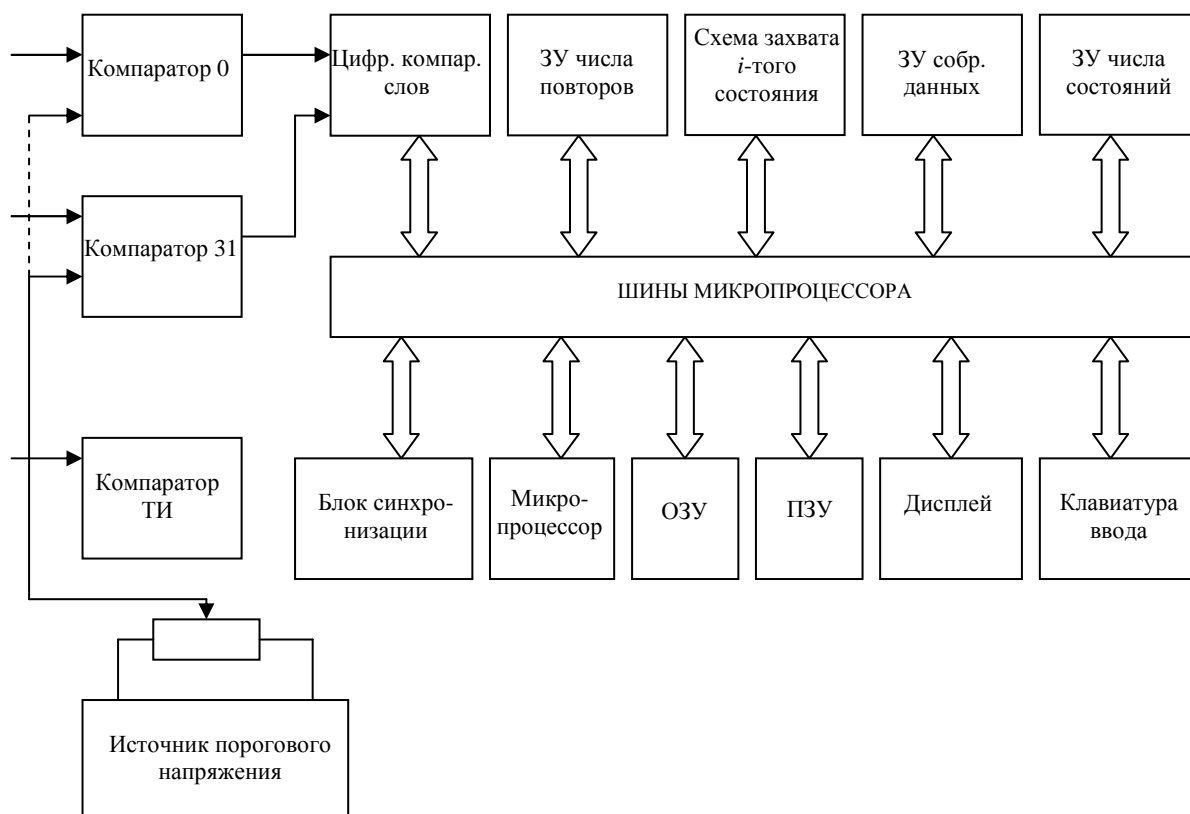


Рис. 9.27. Функциональная схема 32-канального АПД

## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

#### 1. Контроль качества

Процедура, позволяющая принять решение о качестве товара с помощью исследования этого товара каким-либо способом и сравнения результатов исследования с заданным эталоном или стандартом качества, а также принять решение о соответствии партии продукции, сравнивая ее с эталоном качества продукции, называется **контролем качества**.

**Партией продукции** называют группу товаров, произведенных в аналогичных условиях, или товаров, о которых предполагают, что они произведены в аналогичных условиях. Партия, подлежащая контролю, называется **контролируемой партией**.

Проведение контроля для решения вопроса о закупке определенного товара называется **закупочным контролем**. **Приемочный контроль** проводят с целью выяснения, следует ли принимать партию товара, поступившую от субподрядного предприятия. Необходимость передачи полуфабриката на следующий этап определяет **промежуточный контроль**. Если производственный процесс разделен на операции, то такой контроль называют **межоперационным**. Чтобы решить, удовлетворяет ли готовая продукция предъявляемым требованиям, проводят **заключительный контроль**. Контроль, проводимый при отгрузке товара, называют **отгрузочным контролем**.

**Приемочным уровнем качества (AQL)** при выборочном контроле называют предельное значение отклонения от среднего, характеризующее среднее качество процесса, которое обеспечивает соответствие изделия предъявляемым требованиям. В зависимости от уровня контроль делится на обычный, усиленный и ослабленный. **Обычный контроль** проводится тогда, когда считают, что среднее процесса приблизительно соответствует AQL. Когда полагают, что среднее процесса хуже, чем AQL, переходят на **усиленный контроль**, а когда лучше – на **ослабленный** с уменьшением объема выборки.

#### 2. Планы выборок

Данные, отобранные из совокупности с целью определения характера этой совокупности, называются **выборкой**. Процесс получения выборки называется **отбором дискретных данных**.

**Объемом выборки** называется число единиц, составляющих выборку, или размеры ее единиц. Для снижения объема выборки используются **вероятностные способы** получения выборок. Для получения **произвольной выборки** или **простой случайной выборки** используется таблица случайных чисел.

Случайный отбор дискретных данных из слоев или страт, на которые предварительно разбиваются совокупности, называется **расслоенным** или **стратификационным отбором** (отбором со стратификацией). Отбор дискретных данных из кластеров или скоплений (наборов, групп, объединяющих несколько единиц исходной совокупности), образующих укрупненную совокупность, из которой они случайно отбираются с тем, чтобы включить в выборку все отобранные таким образом элементы, входящие в случайные кластеры, называется **кластерным отбором** (отбором с кластеризацией).

Отбор, при котором совокупность разбивается на несколько кластеров, служащих единицами для случайного отбора, из которых затем снова случайным образом отбираются единицы для анализа, называется **двухступенчатым случайным отбором**. Если отбор осуществляется из единиц разных размеров, то выборка строится на **основе пропорционального отбора** таким образом, чтобы вероятность попадания образца в выборку зависела от его размера.

Таким образом, все способы получения выборок призваны оценить характеристики совокупности по минимальному количеству данных с возможно большей точностью.

### 3. Планы контроля

Основой плана контроля служит план для однократной выборки с контролем по числу бракованных единиц продукции, т.е. по качественному признаку. Вывод о соответствии или несоответствии каждой партии предъявляемым требованиям делается на основе **браковочного числа** – количества бракованных изделий в однократно отобранной выборке.

Вероятность того, что данная партия, имеющая долю брака  $p$ , будет признана на основе рассматриваемого плана годной, –  $L(p)$ . Вероятность  $P(r)$  того, что доля брака по выборке объемом  $n$  равна  $r$  в партии объемом  $N$ , определяется по формуле гипергеометрического распределения

$$P(r) = C_{pN}^r \cdot C_{N-pN}^{n-r} / C_N^n. \quad (1)$$

Однако такой расчет очень трудоемок, поэтому при  $N \geq 10n$  обычно пользуются формулой биномиального распределения

$$P(r) = C_n^r \cdot p^r \cdot (1-p)^{n-r}. \quad (2)$$

Если  $N \geq 10n$  и  $np \leq 10$ , то  $P(r)$  приближенно соответствует распределению Пуассона:

$$P(r) = e^{-np} \cdot (np)^r / r! \quad (3)$$

Обозначим долю брака, при которой сохраняется годность продукции, через  $C$ , тогда вероятность  $L(p)$  принятия партии, имеющей процент брака  $p$ , составит

$$L(p) = \sum_{r=0}^C P(r). \quad (4)$$

Обозначив верхнюю границу доли брака в партии, которую можно принять годной, через  $p_0$ , а нижнюю границу доли брака в партии, которую надо признать бракованной, через  $p_1$ , найдем соответствующие вероятности:

$\alpha = 1 - L(p_0)$  – вероятность того, что партия с долей брака  $p_0$  будет признана негодной, называется **риском производителя**;

$\beta = L(p_1)$  – вероятность того, что партия с долей брака  $p_1$  будет признана годной, называется **риском потребителя**.

С помощью констант  $\alpha$  и  $\beta$  определяют характерные точки на **кривой оперативной характеристики** (ОС) (рис. 1).

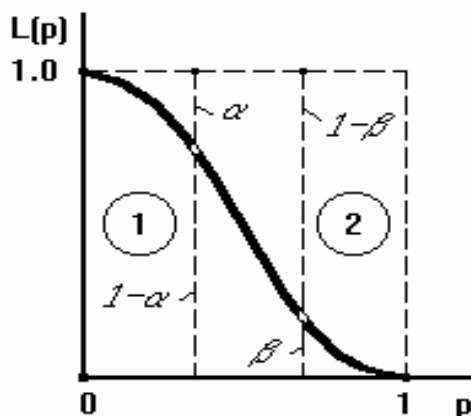


Рис. 1. Кривая оперативной характеристики:

$L(p)$  – вероятность того, что партия будет признана годной;  $\alpha$  – риск производителя;

$\beta$  – риск потребителя;  $p$  – доля брака в партии, обнаруженная при контроле;

1 – область признания партии годной; 2 – область признания партии бракованной

Например, при точном определении  $P(2)$  при  $N = 100$ ,  $n = 10$  и  $p = 0,1$  получаем:

$$P(2) = C_{10}^2 \cdot C_{100-10}^{10-2} / C_{100}^{10} = 0,202,$$

при биномиальном приближении

$$P(2) = C_{10}^2 \cdot 0,1^2 \cdot (1-0,1)^{10-2} = 0,194,$$

при приближении Пуассона со средним  $(10 \cdot 0,1)$ , равным 1,0,

$$P(2) = e^{-1} \cdot (1)^2 / 2 = 0,184.$$

Аналогично определяются расчетные значения  $r$  от 0 до 5 (табл. 1). Однако на практике важно сравнение не вероятностей наличия ровно двух (соответственно 0, ..., 5) бракованных изделий, а сравнение вероятностей более двух (0, ..., 5) бракованных изделий.

Таблица 1

**Вероятности наличия бракованных изделий**

Число бракованных изделий $r$	Точные значения	Биномиальное приближение	Приближение Пуассона
0	0,330	0,349	0,368
1	0,408	0,387	0,368
2	0,202	0,194	0,184
3	0,052	0,057	0,061
4	0,008	0,011	0,015
5	0,000	0,002	0,004
$\geq 1$	0,670	0,651	0,632
$\geq 2$	0,262	0,264	0,264
$\geq 3$	0,060	0,070	0,080
$\geq 4$	0,008	0,013	0,019
$\geq 5$	0,000	0,002	0,004

Таким образом, для упрощения расчетов можно использовать биномиальное приближение, а в ряде случаев для получения оперативных характеристик допускается применять приближение Пуассона.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, РАССЕЙЯНИЕ И РАССЛОЕНИЕ ДАННЫХ

### 1. Контрольный листок

Пусть требуется провести 100 измерений геометрического размера  $L$  одного и того же изделия, а значения измеренного размера (максимальное – 15,14 мм, минимальное – 14,03 мм) лежат в диапазоне  $15,14 - 14,03 = 1,11$  мм (табл. 2).

Таблица 2

Результаты измерений геометрического размера изделия

№ изделия	Результаты измерений, мм									
1 – 10	14,12	14,55	14,26	14,43	14,50	14,46	14,15	14,40	14,22	14,61
11 – 20	14,24	14,42	14,03	14,35	14,18	14,48	14,51	14,52	14,62	14,45
21 – 30	14,32	14,14	14,59	14,51	14,54	14,38	14,27	14,53	14,54	14,64
31 – 40	14,37	14,58	14,56	14,80	14,60	14,48	14,44	14,50	14,38	14,63
41 – 50	14,45	14,46	14,36	14,52	14,33	14,65	14,82	14,61	14,49	14,78
51 – 60	14,81	14,40	14,88	14,47	14,57	14,94	14,60	14,59	14,64	14,70
61 – 70	14,80	14,62	14,43	14,96	14,53	14,58	14,85	14,44	14,41	14,79
71 – 80	14,92	14,55	14,84	14,67	14,57	14,95	14,50	15,06	14,66	14,65
81 – 90	14,71	14,51	14,66	14,94	14,67	15,14	14,56	14,86	14,69	14,77
91 – 100	15,04	14,71	14,79	14,73	14,68	14,78	14,93	14,68	14,75	14,70

Чтобы рассмотреть распределение частот размеров, надо определить ширину и число интервалов, именуемых *классами*. Границы классов обычно задают с точностью до половины следующего разряда после последней значащей цифры. Число классов выбирают в интервале 10 – 20.

Если ширина 0,10, то  $1,11:0,1 = 11,1$ . Округляя до ближайшего большего целого, получим 12 классов (табл. 3).

Такие таблицы подготавливаются заранее и называются *контрольными листками* (табл. 3, 4).

Таблица 3

## Распределение классов по частоте

Класс	Центральное значение	Подсчет частот	Количество размеров (частота)
1. 13,975 – 14,075	14,025	I	1
2. 14,075 – 14,175	14,125	III	3
3. 14,175 – 14,275	14,225	III	5
4. 14,275 – 14,375	14,325	III	5
5. 14,375 – 14,475	14,425	III III III I	16
6. 14,475 – 14,575	14,525	III III III III I	21
7. 14,575 – 14,675	14,625	III III III III	18
8. 14,675 – 14,775	14,725	III III	10
9. 14,775 – 14,875	14,825	III III I	11
10. 14,875 – 14,975	14,925	III II	7
11. 14,975 – 15,075	15,025	II	2
12. 15,075 – 15,175	15,125	I	1
Итого:			100

Округляя границы классов, определяем принадлежность их границ (см. табл. 4).

Таблица 4

## Распределение частот

Измеренные значения $x_i$ , мм	Абсолютная частота $f_i$	Относительная частота $p_i$
1. [ 14,0 – 14,1 ]	1	0,01
2. ] 14,1 – 14,2 ]	4	0,04
3. ] 14,2 – 14,3 ]	4	0,04
4. ] 14,3 – 14,4 ]	7	0,07
5. ] 14,4 – 14,5 ]	16	0,16
6. ] 14,5 – 14,6 ]	22	0,22
7. ] 14,6 – 14,7 ]	18	0,18
8. ] 14,7 – 14,8 ]	11	0,11
9. ] 14,8 – 14,9 ]	8	0,08
10. ] 14,9 – 15,0 ]	6	0,06
11. ] 15,0 – 15,1 ]	2	0,02
12. ] 15,1 – 15,2 ]	1	0,01
Итого:	100	1,00



## 2. Гистограмма

На основе табл. 3, 4 строятся столбиковые диаграммы – *гистограммы* со шкалой абсолютных (см. рис. 4) и относительных (рис. 5) частот. Соединенные ломаной линией центры столбиков образуют *полигон*.

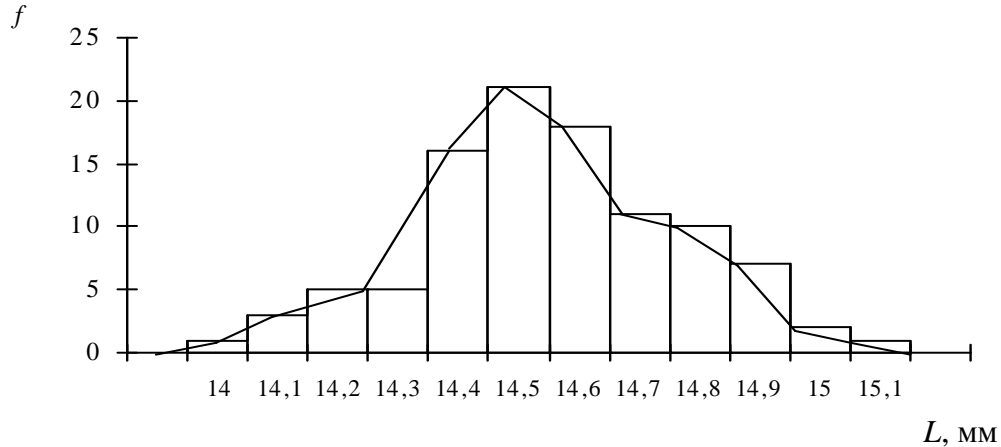


Рис. 4. Гистограмма со шкалой абсолютных частот

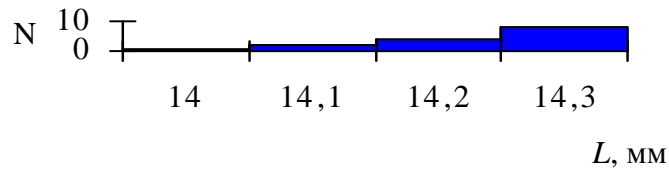


Рис. 5. Гистограмма со шкалой относительных частот

По мере роста числа измерений уменьшают ширину класса, и полигон превращается в *кривую плотности распределения* вероятностей (рис. 6).

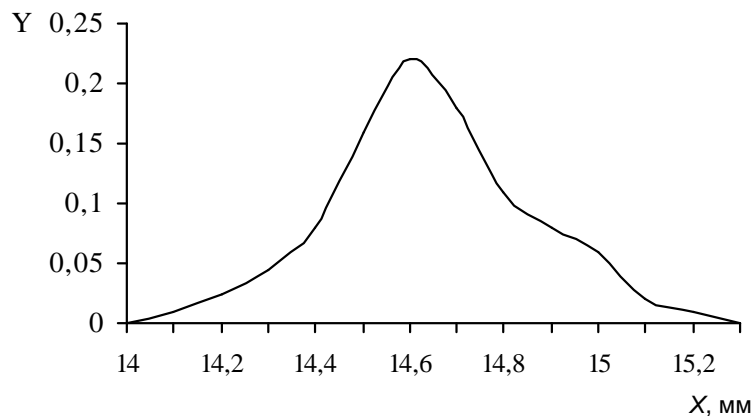


Рис. 6. Кривая плотности распределения  $Y = F(X)$

Для выяснения того, соответствует ли такое распределение нормальному закону, составляют таблицу накопленных частот (табл. 5) и строят накопленный полигон (рис. 7) на нормальной вероятностной бумаге.

Таблица 5

**Накопленные частоты**

Измеренные значения, мм	Частота	Накопленная частота	Накопленная относительная частота
1. 14,0 – 14,1	1	1	0,01
2. 14,1 – 14,2	4	5	0,05
3. 14,2 – 14,3	4	9	0,09
4. 14,3 – 14,4	7	16	0,16
5. 14,4 – 14,5	16	32	0,32
6. 14,5 – 14,6	22	54	0,54
7. 14,6 – 14,7	18	72	0,72
8. 14,7 – 14,8	11	83	0,83
9. 14,8 – 14,9	8	91	0,91
10. 14,9 – 15,0	6	97	0,97
11. 15,0 – 15,1	2	99	0,99
12. 15,1 – 15,2	1	100	1,00

Если точки хорошо ложатся на прямую (см. рис. 7), то можно говорить о соответствии данных нормальному распределению.

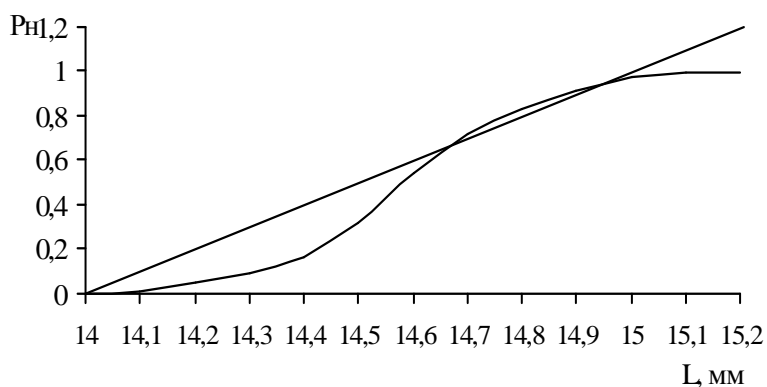


Рис. 7. Накопленный полигон

### 3. Диаграмма рассеяния и поле корреляции

Если сгруппировать данные в классы так, чтобы число значений  $x_1$  было равно  $f_1$ , число значений  $x_2 = f_2$ , а число значений  $x_k = y_k$ , то их сумма  $f_1 + f_2 + \dots + f_k = N$  будет равна общему числу данных, для которых используются *меры положения* и *меры разброса*.

Величины, представляющие центр положения всех данных, называются *мерами положения*. Обычно используются *среднее*, *медиана* и *мода*.

**Среднее** значение определяется по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k x_i \cdot f_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (x_i - a) \cdot f_i + a, \quad (5)$$

где  $a$  – произвольное число, называемое псевдосредним.

**Медиана** (серединная величина) – значение, которое окажется в самой середине ряда после упорядочения данных по возрастанию.

**Мода** – наиболее часто встречающееся значение среди всех данных.

Показатели, характеризующие степень разброса данных, называются **мерами разброса**. Обычно используется **дисперсия**, **стандартное отклонение** и **размах**.

**Дисперсия** определяется по формуле

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 \cdot f_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (x_i - a)^2 \cdot f_i + (a - \bar{x})^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k x_i^2 \cdot f_i - \bar{x}^2. \quad (6)$$

**Среднеквадратичное стандартное отклонение**

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}. \quad (7)$$

**Размах  $R$**  равен разности максимального и минимального значений.

Коэффициент вариации равен отношению стандартного отклонения и среднего значения:

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{x}}. \quad (8)$$

Для выявления силы связи корреляции между  $n$  парами данных для переменных  $x$  и  $y$  ( $x_1; y_1$ ); ( $x_2; y_2$ );...; ( $x_n; y_n$ ) эти данные наносятся на **диаграмму рассеяния** и для них вычисляется **коэффициент корреляции** по формуле

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (9)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – стандартные отклонения  $x$  и  $y$  соответственно;  $n$  – число наблюдений;  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – средние для  $x$  и  $y$ .

Для  $n$  пар данных ( $x_1; y_1$ ); ( $x_2; y_2$ ); ...; ( $x_n; y_n$ ) зависимость между  $x$  и  $y$

$$y - \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} (x - \bar{x}) = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (x - \bar{x}) \quad (10)$$

иногда называют **регрессией**.

Сила связи между случайными величинами  $x$  и  $y$  описывается диаграммой рассеяния (рис. 8), называемой еще *полем корреляции*.

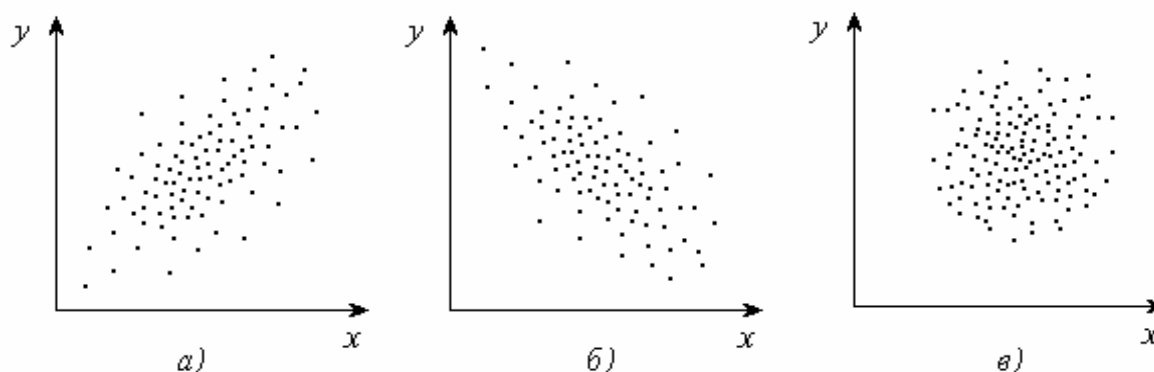


Рис. 8. Диаграммы рассеяния: положительная корреляция (а); отрицательная корреляция (б); отсутствие корреляции (в)

Коэффициент корреляции всегда принимает значения  $-1 < r < 1$ .

При  $r > 0$  – корреляция положительная, при  $r < 0$  корреляция отрицательная, а при  $r = 0$  корреляции нет, т.е. между  $x$  и  $y$  нет линейной регрессионной зависимости.

Если рассмотреть смещение, например,  $(x_1; y_2); (x_2; y_3); \dots; (x_{n-1}; y_n)$ , то поле корреляции будет сдвинуто; подобный сдвиг именуется *временным лагом*. Методом наименьших квадратов определяют линейную зависимость  $Y = a + bx$  при различных временных лагах, рассчитывают коэффициенты корреляции и выбирают коэффициент с максимальным значением для определения времени сдвига рассматриваемой зависимости  $Y = F(X)$ .

#### 4. Расслоение или стратификация данных

При разделении данных на группы их именуют *слоями* или *стратами*, процесс разделения называется *расслоением* или *стратификацией*. Желательно, чтобы различия между слоями были как можно больше, а внутри слоя – как можно меньше.

Если осуществлять стратификацию по факторам, порождающим разброс результатов, то можно выявить главную причину появления наблюдаемого разброса, уменьшить его и этим добиться повышения качества продукции.

Существуют различные способы расслаивания, применение которых зависит от конкретных задач.

Так, в производственных процессах часто используют способ, называемый 4М, учитывающий факторы, зависящие:

- 1) от человека (man);
- 2) от машины (machine);
- 3) от материала (material);
- 4) от метода (method).

Например, стратификация осуществляется:

- 1) по исполнителям – квалификация, стаж (рис. 9);
- 2) по оборудованию – марка, конструкция, срок эксплуатации;
- 3) по материалу – место производства, предприятие, партия;
- 4) по способу производства – технологические приемы, место проведения работ.

Благодаря правильно проведенному расслоению дисперсия внутри слоев резко уменьшается по сравнению с общей дисперсией.

## 5. Методы оценивания контроля

На рис. 9 приведена гистограмма результатов измерений различными исполнителями.

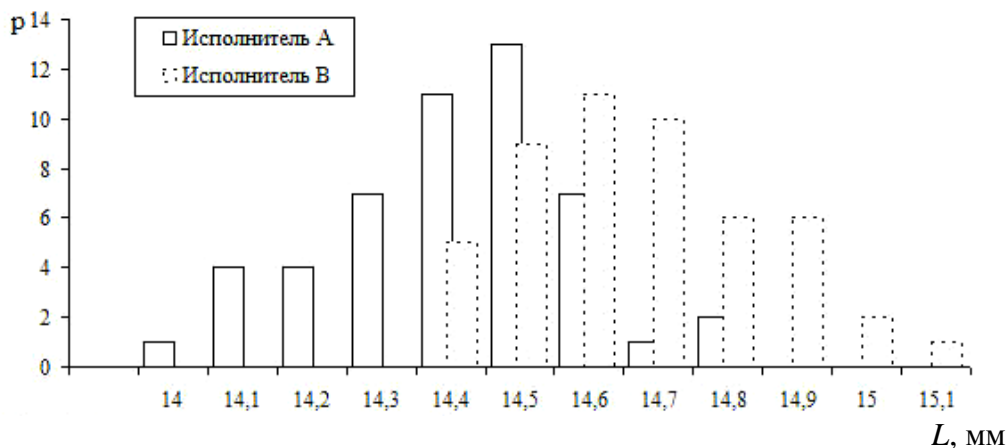


Рис. 9. Гистограмма результатов измерений различными исполнителями

## 6. Коэффициенты корреляции рангов

Контроль с помощью органов чувств человека для оценки показателей качества и получения вывода на основе сравнения со стандартным эталоном называется *органолептическим анализом*. При таком анализе люди, обладающие определенными качествами и отобранные для осуществления проверки, называются *оценщиками* или *экспертами*. Результаты

органолептического анализа могут сильно отличаться в зависимости от индивидуальных различий оценщиков, поэтому их надо обрабатывать статистическими методами. **Коэффициенты корреляции рангов и конкордации** используются для выявления связей между мнениями группы экспертов.

При регулярной оценке двумя экспертами продукции из группы в  $n$  изделий им присваивается знак «+», когда ранг изделия у первого эксперта выше, чем у второго, и «-» в противном случае. Если общую сумму всех разностей оценок обозначить через  $S$ , то

$$\tau = \frac{2S}{n(n-1)} \quad (11)$$

называется **коэффициентом корреляции рангов Кендалла**, который равен 1 при совпадении всех рангов у двух экспертов и -1 – при их противоположности. Если учитывать только отрицательные оценки, а их сумму обозначить ( $-Q$ ), то коэффициент корреляции рангов рассчитывается по формуле

$$\tau = 1 - \frac{4Q}{n(n-1)}. \quad (12)$$

Для определения близости мнений двух экспертов широко применяется оценка, использующая  $d$  (разность рангов),

$$R = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}, \quad (13)$$

называемая **коэффициентом корреляции рангов Спирмена**.

Кроме того, используя  $R$ , можно определить наличие или отсутствие корреляции. Так, при  $n = 10$

$$T = R \sqrt{\frac{n-2}{1-R^2}}, \quad (14)$$

оценка приближенно следует  $t$ -распределению с  $(n - 2)$  числом степеней свободы.

Пусть требуется рассмотреть 10 изделий, которым присвоены порядковые номера, и двум экспертам А и В поручено проранжировать их по убыванию качества (табл. 6).

Таблица 6

**Ранжировки экспертов**

Изделия	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Эксперт А	2	1	3	4	6	5	8	7	10	9
Эксперт В	3	2	1	4	6	7	5	9	10	8
Разность рангов, $d$	-1	-1	2	0	0	-2	3	-2	0	1
Квадрат разностей рангов, $d^2$	1	1	4	0	0	4	9	4	0	1

Переписываем таблицу так, чтобы данные ранжировки эксперта А были упорядочены по возрастанию (табл. 7).

Таблица 7

**Инверсии в ранжировках**

Эксперт А	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Эксперт В	2	3	1	4	7	6	9	5	8	10
Инверсии	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0

Подсчитываем последовательно для результатов эксперта В число данных справа, которое меньше 2, 3, ..., 11 соответственно, и строим ряд инверсий 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0. Сумма числа инверсий  $Q = 6$ , и для  $n = 10$  коэффициент корреляции рангов Кендалла

$$\tau = 1 - \frac{4 \cdot 6}{10 \cdot (10 - 1)} = 0,733.$$

Сумма квадратов разностей  $\sum_{i=1}^n d^2 = 24$ , поэтому коэффициент корреляции рангов Спирмена

$$R = 1 - \frac{6 \cdot 24}{10^3 - 10} = 0,846.$$

Коэффициент корреляции рангов  $R$  равен +1, когда мнения двух экспертов совпадают полностью, и -1, когда они взаимнообратны.

Рассмотрим корреляцию ранжировок, используя  $t_{n-2}$ -распределение и полученный  $R$

$$T = 0,846 \cdot \sqrt{\frac{10 - 2}{1 - 0,846^2}} = 4,488.$$

Это значение больше, чем табличное  $t_8(0,01) = 3,355$ , следовательно, степень близости ранжировок высока.

## 7. Коэффициент конкордации

Для оценки совпадения мнений  $m$  экспертов используют **коэффициент конкордации**  $W$ . Поскольку сумма рангов, выставленных одним экспертом для  $n$  изделий, равна  $n(n + 1)/2$ , то общая сумма рангов  $mn(n + 1)/2$ , разделив ее на количество изделий, получим  $m(n + 1)/2$  – ожидаемое значение суммы рангов изделия.

Суммы рангов достигают максимума при полном совпадении оценок экспертов и для различных изделий соответственно равны:  $m, 2m, \dots, nm$ .

Рассмотрим максимальную сумму квадратов разностей:

$$\begin{aligned} S_{\max} &= \left(m - \frac{m(n+1)}{2}\right)^2 + \left(2m - \frac{m(n+1)}{2}\right)^2 + \dots + \left(nm - \frac{m(n+1)}{2}\right)^2 = \\ &= m^2 \left( (1^2 + 2^2 + \dots + n^2) - (n+1)(1+2+\dots+n) + n \left(\frac{n+1}{2}\right)^2 \right) = m^3 \frac{n^3 - n}{12}. \end{aligned} \quad (15)$$

Однако на практике в мнениях экспертов возникают некоторые расхождения, поэтому, используя фактические суммы рангов изделий  $S_i$ , получаем ожидаемое значение

$$S_c'' = \sum_{i=1}^n (S_i - m(n+1)/2)^2, \quad (16)$$

которое меньше, чем  $S_{\max}$ , а их отношение служит для определения степени совпадения мнений экспертов  $W$ :

$$W = \frac{S_c''}{S_{\max}} = \frac{12S_c''}{m^2(n^3 - n)}. \quad (17)$$

Рассмотрим семь изделий, которые оценивали пять экспертов (табл. 8).

Так как  $m = 5$ , а  $n = 7$ , то  $m(n + 1)/2 = 20$  и

$$\begin{aligned} S_{ож} &= (11 - 20)^2 + (16 - 20)^2 + (16 - 20)^2 + (23 - 20)^2 + (30 - 20)^2 + \\ &+ (15 - 20)^2 + (29 - 20)^2 = 328. \end{aligned}$$

Подставляя ожидаемое значение в формулу коэффициента конкордации, получаем

$$W = \frac{12 \cdot 328}{5^2 \cdot (7^3 - 7)} \sigma_X = 0,47.$$

Это означает, что оценки экспертов не случайны, т.к.  $W$  не равен нулю, но до полного совпадения ( $W = 1$ ) им далеко.



## Оценки экспертов

Изделия	1	2	3	4	5	6	7
Эксперт А	2	4	3	7	5	1	6
Эксперт В	4	5	2	3	6	1	7
Эксперт С	1	3	2	4	6	5	7
Эксперт D	3	1	4	2	7	6	5
Эксперт Е	1	3	5	7	6	2	4
Сумма рангов, $S$	11	16	16	23	30	15	29

## 8. Метод парных сравнений

Один эксперт может сравнить между собой  $n$  контролируемых объектов. При этом в качестве меры *непротиворечивости* сравнения используется число  $K$ , учитывающее количество встретившихся противоречий  $T$ , т.е. число встретившихся *циклических треугольников*:

$$K = 1 - \frac{24T}{n^3 - n} \text{ при нечетном } n; \quad (18)$$

$$K = 1 - \frac{240T}{n^3 - 40n} \text{ при четном } n. \quad (19)$$

Если в *парных сравнениях* выводы о каждом из  $n$  изделий совершенно случайны, то среднее  $\mu$  и дисперсия  $\sigma^2$  общего числа  $T$  получаемых циклических или обходных треугольников имеют вид:

$$\mu = n(n-1)(n-2)/24; \quad (20)$$

$$\sigma^2 = n(n-1)(n-2)/32. \quad (21)$$

При большом  $n$  можно считать, что закон распределения  $T$  близок к нормальному.

Когда объект А предпочтительнее В, можно записать:  $A \leftarrow B$  или  $B \rightarrow A$ . При этом, если из  $A \leftarrow B$  и  $B \leftarrow C$  вытекает вывод, что  $A \leftarrow C$ , то противоречия нет. Это можно выразить графически треугольником, у которого  $\overrightarrow{CB} + \overrightarrow{BA} = \overrightarrow{CA}$ , называемым *непротиворечивым треугольником* или *треугольником суммы* (рис. 10, а).

Однако если из  $A \leftarrow B$  и  $B \leftarrow C$  сделан вывод, что  $C \leftarrow A$ , то возникает противоречие  $\overrightarrow{CB} + \overrightarrow{BA} = -\overrightarrow{CA}$ , графически представляемое в виде *противоречивого треугольника* или *циклического треугольника* (см. рис. 10, б).

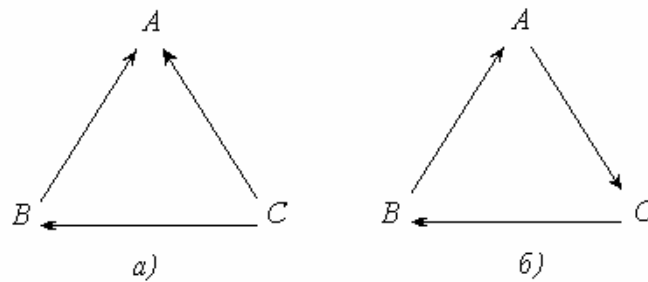


Рис. 10. Треугольник суммы (а) и циклический треугольник (б)

При числе объектов, равном  $n$ , число пар, составленных из них, будет  $C_n^2$ .

Так, для  $n = 7$  изделий  $C_7^2 = 21$ , а матрица предпочтений представляет таблицу, в которой на пересечении столбца и строки ставится при предпочтении 1, в противном случае 0 (табл. 9).

Таблица 9

### Матрица предпочтений

Изделия	1	2	3	4	5	6	7
1	–	1	1	0	0	0	1
2	0	–	0	0	0	0	1
3	0	1	–	0	1	1	1
4	1	1	1	–	0	1	1
5	1	1	0	1	–	1	1
6	1	1	0	0	0	–	1
7	0	0	0	0	0	0	–

Если эти предпочтения изобразить графически, то получится **многоугольник** или **граф предпочтений** (рис. 11).

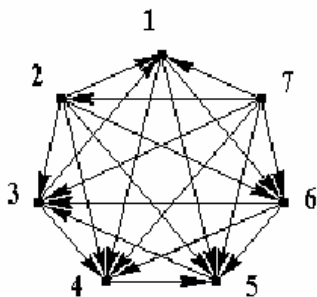


Рис. 11. Многоугольник предпочтений с циклическими треугольниками:

$$\Delta 1-3-5, \Delta 1-3-6, \Delta 3-4-5$$

Противоречивость вывода можно оценить, подсчитывая число циклических треугольников, входящих в структуру многоугольника предпочтений. Поскольку  $n = 7$ ,  $T = 3$ , то мера непротиворечивости

$$K = 1 - \frac{24 \cdot 3}{7^3 - 7} = 0,786.$$

Если бы вывод был совершенно случайным, то среднее  $\mu$  и дисперсия  $\sigma$  числа циклических треугольников  $T$  были бы равны:

$$\mu = 7(7-1)(7-2)/24 = 8,75;$$

$$\sigma^2 = 7(7-1)(7-2)/32 = 6,56.$$

Рассмотрим отношение отклонений:

$$\frac{T - \mu}{\sigma} = \frac{3 - 8,75}{\sqrt{6,56}} = -2,24.$$

Его значение выходит даже за одностороннюю 5 %-ную точку (-1,64) нормального распределения, следовательно, число циклических треугольников, полученных в результате оценки, значительно меньше, чем при совершенно случайной оценке.

## 9. Критерий Джурана

Результаты органолептического анализа обычно имеют большие расхождения в связи с характером тех методов оценки, которыми пользуются эксперты. Поэтому важно проверять правильность контроля каждым экспертом.

Пусть экспертами подготовлена *контрольная выборка* из объектов, разделенных на  $l$  классов, которые заранее известны (но не самим экспертам) из независимых точных измерений. На основе выводов экспертов о принадлежности каждого объекта тому или иному из  $l$  классов получена матрица  $[N]$ , элементы которой  $n_{ij}$  описывают количество продукции, которую эксперт отнес к классу  $i$ , тогда как она на самом деле принадлежала к классу  $j$ .

На практике существует опасность признания бракованной продукции годной и годной продукции бракованной. Поэтому экспертам последовательно дают для оценки в качестве контрольной выборки объекты  $n_{11}$  и  $n_{12}$ , о которых известно, что они годные, и объекты  $n_{21}$  и  $n_{22}$ , о которых известно, что они бракованные. Объекты  $n_{11}$  и  $n_{22}$  правильно оценены – годный как годный, бракованный как бракованный, а  $n_{12}$  и  $n_{21}$  оценены ошибочно – годный как бракованный, а бракованный как годный.

Для такого случая можно рассчитать критерий Джурана

$$\sigma = (n_{22} - n_{12}) / (n_{22} - n_{12} + n_{21}), \quad (22)$$

в котором  $n_{22}$  – правильно выявленный брак;  $n_{12}$  – годная продукция, ошибочно оцененная как брак;  $n_{21}$  – пропущенный брак.

Так как в критерии Джурана главное внимание обращено на определение брака, то он годится для его выявления, однако в связи с односторонностью оценок широкого применения не нашел.

## 10. Информационный критерий

Если обозначить объем контрольной выборки через

$$n = \sum_{k=1}^l \sum_{m=1}^l n_{km}, \quad (23)$$

а вероятность правильной передачи сообщения и его приема соответственно

$$P_1(k) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^l n_{km}; \quad (24)$$

$$P_2(m) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^l n_{km}, \quad (25)$$

а также

$$P(k, m) = \frac{n_{km}}{n}, \quad (26)$$

можно оценить *объем переданной информации J* через *энтропию H*:

$$J(k, m) = H(k) + H(m) - H(k, m), \quad (27)$$

где

$$H(k) = - \sum_{k=1}^l P_1(k) \log P_1(k); \quad (28)$$

$$H(m) = - \sum_{m=1}^l P_2(m) \log P_2(m); \quad (29)$$

$$H(k, m) = - \sum_{k=1}^l \sum_{m=1}^l P(k, m) \log P(k, m). \quad (30)$$

Используя соотношение  $J/H$  для переданного сообщения, получим информационный критерий

$$E = J(k, m)/H(k), \quad (31)$$

величина которого не зависит от выбора основания логарифмов;  $E = 1$ , когда вывод абсолютно верен,  $E = 0$ , когда абсолютно случаен.

Пусть по контрольной выборке, включающей четыре класса изделий А, В, С, Д, проведена экспертная оценка (табл. 10).

## Расчет информационного критерия

	А	В	С	Д	Итого	$P_1(k)$
А	10	2	0	0	12	12/56
В	1	18	1	0	20	20/56
С	0	3	17	0	20	20/56
Д	0	0	1	3	4	4/56
Итого	11	23	19	3	56	1
$P_2(m)$	11/56	23/56	19/56	3/56	1	

Рассчитаем энтропии  $H(k)$ ,  $H(m)$ ,  $H(k, m)$ . Для удобства в качестве основания логарифма возьмем 2. В теории информации такая единица измерения называется **битом**. В результате расчетов получаем:

$$H(k) = - \left[ \frac{12}{56} \log_2 \frac{12}{56} + \frac{20}{56} \log_2 \frac{20}{56} + \frac{20}{56} \log_2 \frac{20}{56} + \frac{4}{56} \log_2 \frac{4}{56} \right] = 1,809 \text{ бит};$$

$$H(m) = - \left[ \frac{11}{56} \log_2 \frac{11}{56} + \frac{23}{56} \log_2 \frac{23}{56} + \frac{19}{56} \log_2 \frac{19}{56} + \frac{3}{56} \log_2 \frac{3}{56} \right] = 1,747 \text{ бит};$$

$$H(k, m) = - \left( \left[ \frac{10}{56} \log_2 \frac{10}{56} + \frac{2}{56} \log_2 \frac{2}{56} \right] + \left[ \frac{1}{56} \log_2 \frac{1}{56} + \frac{18}{56} \log_2 \frac{18}{56} + \frac{1}{56} \log_2 \frac{1}{56} \right] + \left[ \frac{3}{56} \log_2 \frac{3}{56} + \frac{17}{56} \log_2 \frac{17}{56} \right] + \left[ \frac{1}{56} \log_2 \frac{1}{56} + \frac{3}{56} \log_2 \frac{3}{56} + \frac{4}{56} \log_2 \frac{4}{56} \right] \right) = 2,427 \text{ бит}.$$

Отсюда

$$J_{k,m} = 1,809 + 1,747 - 2,427 = 1,126 \text{ бит}.$$

Информационный критерий

$$E = 1,126/1,809 = 0,622,$$

что свидетельствует о высокой достоверности проведенной проверки.

## ДИАГРАММЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

### 1. Диаграмма «причины – результат»

Схемы, характеризующие зависимость между полученными результатами и причинами, воздействующими на эти результаты, именуются **диаграммами «причины – результат»** (рис. 12). Диаграмма «причины – результат» – эффективное средство выявления главных причин.

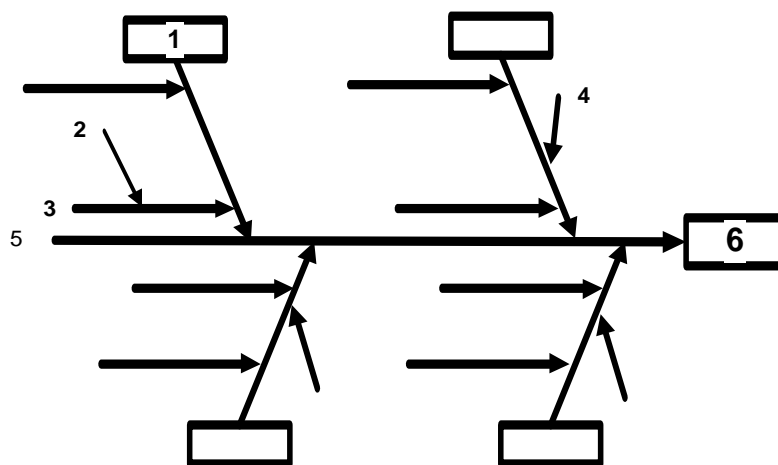


Рис. 12. Структура диаграммы «причины – результат»: 1 – факторы (причины); 2 – малая «кость»; 3 – средняя «кость»; 4 – большая «кость»; 5 – «хребет»; 6 – характеристика (результат)

Контроль качества изделий играет большую роль в удовлетворении требований потребителя и начинается на этапе разработки продукции. Достижение этой цели связано с ростом затрат на контроль качества. Для анализа затрат, связанных с контролем качества, составляют диаграмму «причины – результат», основанную на результатах опроса мнений персонала (рис. 13).

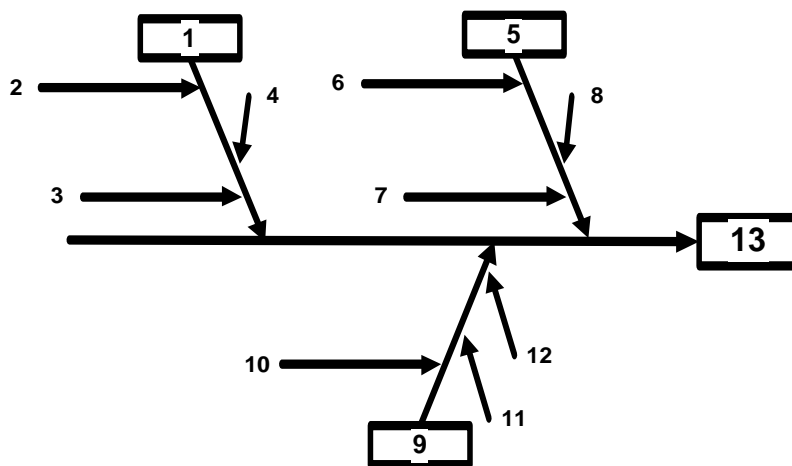


Рис. 13. Диаграмма «причины – результат» для причин, вызывающих рост затрат на контроль качества: 1 – расходы на профилактику брака; 2 – расходы на разработку правил контроля; 3 – расходы на обучение персонала; 4 – расходы на проверку калибров и измерительных инструментов; 5 – расходы на ужесточение контроля; 6 – увеличение расходов на ремонт измерительных устройств; 7 – увеличение расходов на составление программы испытаний и контроля; 8 – увеличение расходов на испытания; 9 – расходы на брак; 10 – расходы на возврат продукции; 11 – расходы на переделку изделий; 12 – расходы от рекламаций на продукцию; 13 – рост затрат на контроль качества

## 2. Диаграмма Парето

Схема, построенная на основе группирования по дискретным признакам, ранжирования в порядке убывания (например, по частоте появления) и показывающая кумулятивную или накопленную частоту, называется **диаграммой распределения Парето**. Диаграмма распределения, основанная на кривой Лоренца (рис. 14) и базирующаяся на теории распределения доходов Парето, позволяет выявить главные причины, осуществить распределение усилий и разработать мероприятия для процессов управления.

Диаграмма Парето показывает, что имеется много случаев, когда большая часть бракованной продукции или сумма убытков обуславливается небольшой частью факторов. Следовательно, для получения максимального эффекта необходимо разрабатывать мероприятия, обращая главное внимание на эти факторы.

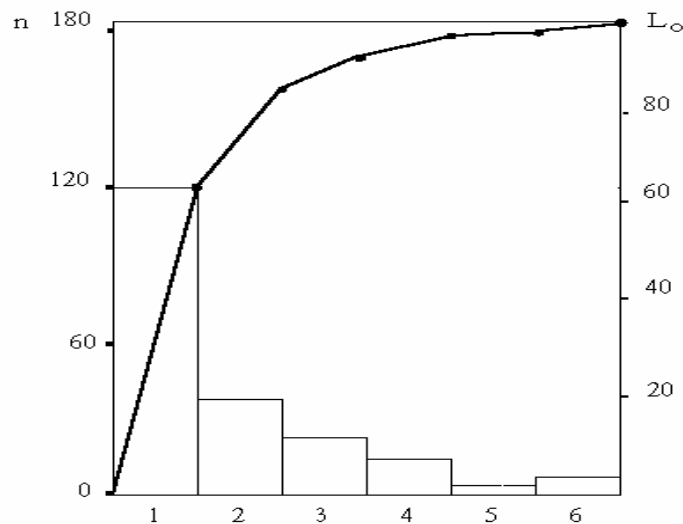


Рис. 14. Диаграмма Парето для некачественной продукции по видам брака:  $n$  – число бракованных единиц продукции;  $L_0$  – относительная накопленная частота; 1 – ошибки в процессе производства; 2 – некачественное сырье, 3 – некачественные орудия труда; 4 – некачественные средства контроля; 5 – ошибочная конструкторская и технологическая документация; 6 – прочее

## 3. ABC-анализ

Способ учета, когда по оси абсцисс в процентах откладывается накопленная численность ресурсов, а по оси ординат в процентах – накопленные суммы итогов деятельности, называется **ABC-анализом**.

В случае управления запасами на складе ABC-анализ представляет собой способ оптимального управления с отслеживанием периодов наибольшего скопления продукции (рис. 15). Чтобы ранжировать в порядке убывания частоты использования всех видов продукции, их объединяют в три группы:

А – сильноменяющаяся (запасы постоянно используемых изделий);

В – следующая за ней, среднеменяющаяся (запасы периодически используемых изделий);

С – слабоменяющаяся (запасы редко используемых изделий).

ABC-анализ основывается на диаграмме Парето. В нем наибольшее внимание уделяют управлению изделиями группы А (так называемое жесткое управление), затем – управлению изделиями группы В, а относительно изделий группы С применяют мягкое управление.

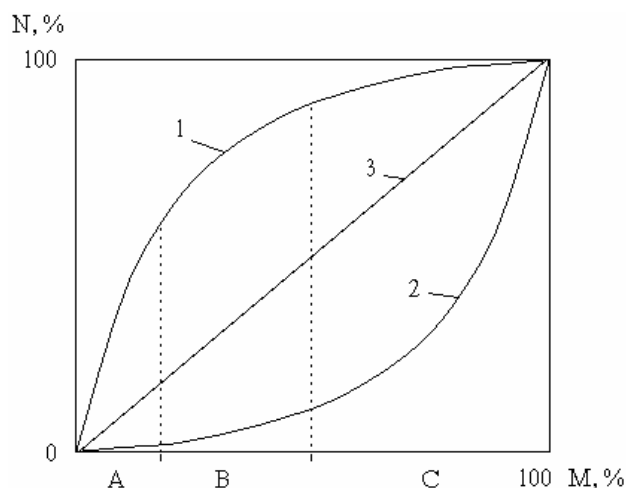


Рис. 15. ABC-анализ управления складированием: М – накопленные проценты по числу изделий; N – накопленные проценты суммы поступлений со склада; 1 – кривая Парето (для накопления в убывающем порядке); 2 – кривая Лоренца (для накопления в возрастающем порядке); 3 – линия равновесия (диагональ)

Рассмотрим проблему складирования на предприятии, хранящем широкую номенклатуру изделий, анализируя при этом годовые запасы выдаваемых со склада наиболее дорогостоящих изделий.

Строим таблицу накопления до 100 % (табл. 11):

– столбец 2 – центры классов, равные среднеарифметическому их границ (столбец 1);

– столбец 4 – накопленные суммы, определяющиеся как (столбец 2) × (столбец 3) + Σ(столбец 2) × (столбец 3) предыдущих строк;



- столбец 5 – процент от общей суммы в последней строке (столбец 4);
- столбец 7 – процент накопленного запаса изделий (столбец 6) от всего количества изделий в последней строке (столбец 6).

Таблица 11

### Накопленные проценты

Складские запасы, млн руб.	Запасы (центр класса)	Число изделий	Складские запасы		Число изделий	
			Накопленная сумма	Проценты %	Накопленные изделия	Проценты
1	2	3	4	5	6	7
7 – 8	7,5	1	7,5	5,0	1	1,3
6 – 7	6,5	2	20,5	13,7	3	3,8
5 – 6	5,5	4	42,5	28,3	7	8,8
4 – 5	4,5	5	65,0	43,3	12	15,0
3 – 4	3,5	7	89,5	59,7	19	23,8
2 – 3	2,5	4	99,5	66,3	23	28,8
1 – 2	1,5	22	132,5	88,0	45	56,3
0 – 1	0,5	35	150,0	100,0	80	100,0

По результатам расчетов получаем диаграмму (рис. 16).

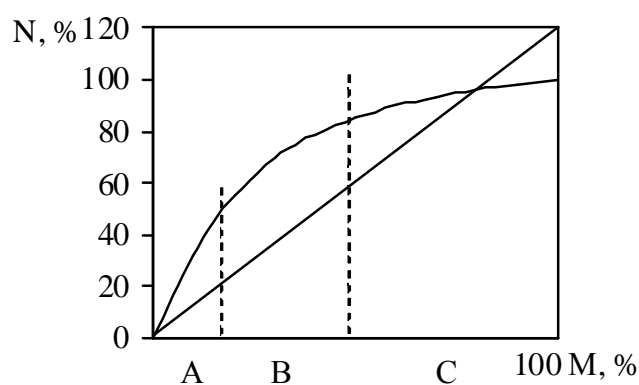


Рис. 16. Диаграмма Парето и ABC-анализ управления складированием:

M – накопленные проценты по числу изделий;

N – накопленные проценты запасов

Номенклатура и число изделий, входящих в группу А, невелики,  $1 + 2 + 4 + 5 = 12$ , поэтому требуется жесткое управление их запасами.

# КАРТЫ УПРАВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ДАННЫХ

## 1. Контрольные карты

Для ответа на вопрос, находится ли производственный процесс в контролируемом состоянии, строятся **контрольные карты**, представляющие собой диаграммы количественных характеристик или качественных признаков, отложенных относительно центральной линии (CL), верхнего (UCL) и нижнего (LCL) контрольных пределов (рис. 17).

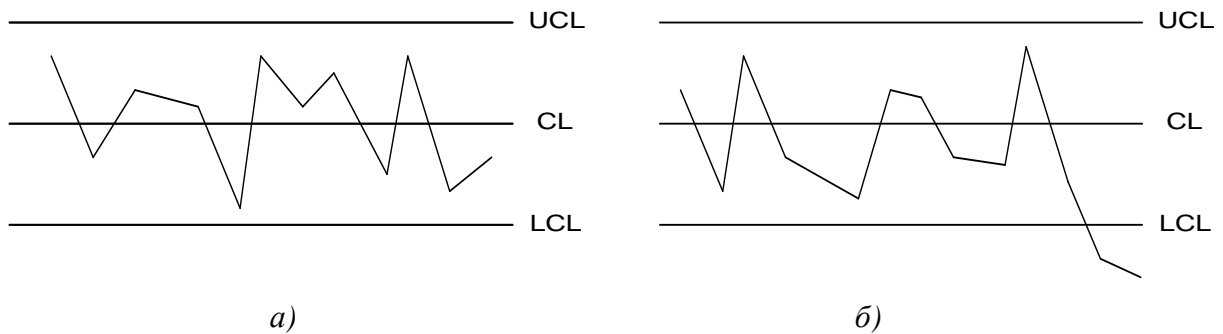


Рис. 17. Состояния процессов:  
стабильное управляемое (а) и нестабильное неуправляемое (б)

Если на контрольной карте нанесены экспериментальные точки и в результате:

- а) все 25 точек подряд;
  - б) 34 и более точек из 35 подряд;
  - в) 98 и более точек из 100 подряд лежат внутри границ контрольных линий,
- то можно считать, что производственный процесс находится в стабильном состоянии.

Информацию, необходимую для управления качеством, можно получить, отыскав причины:

- а) смещения точек вверх или вниз;
- б) регулярного колебания точек вверх-вниз;
- в) расположения подряд по одну сторону от центральной линии: 7 точек или 10 из 11 точек, или 12 из 14 точек, или 14 из 17 точек, или 16 из 20 точек.

Контрольные карты используются в соответствии с контролируемым параметром как для количественных характеристик, так и для качественных признаков (табл. 12).

Таблица 12

**Контрольные карты и контрольные пределы**

Название контрольной карты	Контролируемый параметр	Контрольные пределы
Контрольная карта $\bar{x}$	Среднее	$\bar{\bar{x}} \pm A\bar{R}$
Контрольная карта $R$	Размах	$D_2\bar{R}, D_1\bar{R}$
Контрольная карта $pn$	Количество брака	$\bar{pn} \pm 3\sqrt{\bar{pn} \cdot (1 - \bar{p})}$
Контрольная карта $p$	Процент брака	$\bar{p} \pm 3\sqrt{\bar{p} \cdot (1 - \bar{p}) / n}$
Контрольная карта $c$	Число дефектов на одно изделие	$\bar{c} \pm 3\sqrt{\bar{c}}$
Контрольная карта $u$	Число дефектов на единицу площади	$\bar{u} \pm 3\sqrt{\bar{u} / n}$

В табл. 12 для верхнего предела (UCL) знак «+» и для нижнего предела (LCL) знак «-»,  $D_1$ ,  $D_2$  для верхнего и нижнего пределов соответственно, а сами граничные коэффициенты  $A$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  – константы, принимаемые по объему выборки  $n$  из табл. 13. Средние значения  $\bar{R}$ ,  $\bar{p}$ ,  $\bar{u}$ ,  $\bar{c}$  рассчитываются из предыдущих данных.

Таблица 13

**Граничные коэффициенты**

Объем $n$ выборки одной группы	Коэффициенты		
	$A$	$D_1$	$D_2$
2	1,880	–	3,267
3	1,023	–	2,575
4	0,729	–	2,282
5	0,577	–	2,115
6	0,483	–	2,004
7	0,419	0,076	1,924
8	0,373	0,136	1,864
9	0,337	0,184	1,816
10	0,308	0,223	1,777

## 2. Контрольная карта $\bar{x} - R$

Для построения **контрольной карты**  $\bar{x} - R$  обрабатываются данные, собранные специально за определенный промежуток времени. Результаты измерений отдельных изделий объединяют в  $k$  групп (обычно  $k = 20 - 25$ ), объемом  $n$  результатов ( $n = 4 - 5$ ), и определяют их средние характеристики  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$ . Затем рассчитывают среднее  $\bar{\bar{x}}$  этих средних, и оно становится центральной линией контрольной карты  $\bar{x}$ . Потом для каждой группы определяют размахи  $R_1, R_2, \dots, R_k$ , и их среднее  $\bar{R}$  принимают за центральную линию контрольной карты  $R$ .

Если случайная величина  $x$  имеет нормальное распределение  $N(\mu, \sigma^2)$ , то вероятность попадания фактических результатов в узкие рамки определяется зависимостями

$$P(\mu - 1,96\sigma < X < \mu + 1,96\sigma) = 0,95 \text{ для } 95 \% ,$$

$$P(\mu - 2,58\sigma < X < \mu + 2,28\sigma) = 0,99 \text{ для } 99 \% ,$$

где  $\mu$  – математическое ожидание;  $\sigma$  – дисперсия.

Округляя коэффициенты перед  $\sigma$ , получим вместо  $1,96 - 2$ , а вместо  $2,58 - 3$ . В результате вероятность попадания фактических результатов в пределы: среднее  $\pm 2\sigma$  превышает 95 %, а  $\pm 3\sigma - 99$  %. Для последнего случая вероятность выхода за  $3\sigma$  менее 1 %, и этот метод оценки получил название «*три сигма*». При выборке объемом  $n$  ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) нормальной совокупности  $N(\mu, \sigma^2)$  распределение выборочного среднего  $\bar{x}$  будет тоже нормальным распределением  $N(\mu, \sigma^2/n)$ . Поскольку стандартное отклонение  $\sigma$  распределения равно  $\sigma/\sqrt{n}$ , то, зная генеральное среднее  $\mu$  и генеральное стандартное отклонение  $\sigma$ , по правилу «три сигма» можно определить верхний и нижний контрольные пределы  $\bar{x}$ :

$$UCL = \mu + 3 \cdot \sigma / \sqrt{n}; \quad (32)$$

$$LCL = \mu - 3 \cdot \sigma / \sqrt{n}. \quad (33)$$

Оценка математического ожидания

$$\mu = \bar{\bar{x}}. \quad (34)$$

Оценка стандартной ошибки

$$\sigma = \bar{R} / d_n, \quad (35)$$

где  $d_n$  – коэффициент, зависящий только от  $n$ .

Обозначив

$$A = 3 / (d_n \sqrt{n}), \quad (36)$$

получаем

$$UCL = \bar{x} + A\bar{R}; \quad (37)$$

$$LCL = \bar{x} - A\bar{R}. \quad (38)$$

Контрольные пределы для  $R$  определяются аналогично, при этом если нижний контрольный предел окажется отрицательным числом, он в расчет не принимается и граничный коэффициент  $D_1$  при  $n \leq 6$  (см. табл. 13) не вычисляется:

$$UCL = D_2 \bar{R}; \quad (39)$$

$$LCL = D_1 \bar{R}. \quad (40)$$

### 3. Контрольные карты $pn, p, c, u$

Примем, что средний процент брака в производственном процессе стабилизирован на уровне  $p$ . Тогда, если обозначить через  $x$  число бракованных изделий из числа отобранных  $n$ , то  $x$  будет следовать биномиальному распределению  $B(n, p)$ , и поэтому среднее

$$\mu = pn, \quad (41)$$

а дисперсия

$$\sigma^2 = pn(1 - p). \quad (42)$$

Поскольку неизвестен генеральный процент брака  $p$ , используется  $\bar{p}$ , определяемое на основе предварительных данных. В результате получают контрольные пределы для количества бракованных единиц продукции  $x$  в *контрольной карте  $pn$* :

$$UCL = \bar{pn} + 3\sqrt{\bar{pn}(1 - \bar{p})}; \quad (43)$$

$$LCL = \bar{pn} - 3\sqrt{\bar{pn}(1 - \bar{p})}. \quad (44)$$

Если проанализировать распределение  $x/n$ , то окажется, что

$$\mu = p; \quad (45)$$

$$\sigma^2 = p(1-p)/n. \quad (46)$$

Используя процент брака  $\bar{p}$ , на основе предварительных данных определяем контрольные пределы для  $p$  в **контрольной карте  $p$** :

$$UCL = \bar{p} + 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n}; \quad (47)$$

$$LCL = \bar{p} - 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n}. \quad (48)$$

Если производственный процесс стабилен, то можно воспользоваться тем, что число дефектов на одно изделие и на единицу площади подчиняется распределению Пуассона, и получить **контрольную карту  $c$**  и **контрольную карту  $u$** .

Значения  $\bar{c}$  и  $\bar{u}$  определяются по предварительным данным как отношение числа дефектов к числу измерений или измеряемой площади.

Поскольку контрольные пределы карты  $c$

$$UCL = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}; \quad (49)$$

$$LCL = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}, \quad (50)$$

а карты  $u$

$$UCL = \bar{u} + 3\sqrt{\bar{u}/u}; \quad (51)$$

$$LCL = \bar{u} - 3\sqrt{\bar{u}/u}, \quad (52)$$

то если  $\bar{c} \leq 9$  или  $\bar{u}/n \leq 9$ , нижний контрольный предел не определяется и его вообще можно не учитывать.

# ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ

## Лабораторная работа № 1

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ

#### 1. Статистическая настройка оборудования

Для осуществления технологической операции необходимо произвести предварительную настройку (наладку) оборудования. *Настройкой* или *наладкой* называется процесс подготовки оборудования и средств оснащения к выполнению определенной технологической операции.

Задачами настройки являются:

- 1) установка приспособлений и инструментов;
- 2) установка режимов работы оборудования.

В случаях, когда требуемая точность достигается методом автоматического получения размеров на настроенном оборудовании, добавляется третья задача – обеспечение точности взаимного расположения инструментов, приспособлений и других устройств. Третья задача, решение которой в значительной степени определяет точность обработки, является наиболее сложной и ответственной, требующей проведения специальных расчетов.

В настоящее время применяются следующие методы настройки оборудования: статистическая настройка, настройка с помощью рабочего калибра и настройка с помощью универсальных мерительных средств.

*Метод статистической настройки* заключается в установке инструмента по калибрам и эталонам на неподвижном оборудовании.

Для сокращения времени настройки установка инструмента производится по детали-эталону или специальному калибру, который располагается на месте обрабатываемой заготовки. Инструмент доводится до соприкосновения с поверхностью калибра и закрепляется. Одновременно устанавливаются соответствующие упоры.

При статистической настройке оборудования в связи с деформациями в технологической системе размер обработанного изделия отличается от требуемого. Для компенсации изменения фактических размеров обрабатываемых заготовок установочные калибры или эталонные детали при статистической настройке изготавливаются с отступлением от чертежа заготовки на величину некоторой поправки  $\Delta_{nonp}$ . В этом случае счетный настроечный размер  $L_n^{pac}$  установочного калибра определяется по формулам

$$L_n^{pac} = L_n^{zag} \mp \Delta_{nonp} ;$$

$$L_n^{3a2} = (L_{\min} + L_{\max}) / 2,$$

где  $L_n^{3a2}$  – размер заготовки, который должен быть фактически получен после обработки, когда настройка оборудования ведется по середине поля допуска заготовки;  $L_{\min}$  и  $L_{\max}$  – соответственно наименьший и наибольший предельные размеры заготовок по чертежу;  $\Delta_{\text{нопр}}$  – поправка, учитывающая деформацию в технологической системе и шероховатость поверхности эталонной детали, по которой производится настройка,

$$\Delta_{\text{нопр}} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3,$$

где  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  – составляющие поправки, учитывающие соответственно действие сил при обработке, шероховатость обрабатываемых заготовок и величину зазоров в узлах оборудования. Знак «минус» при определении  $L_n^{\text{pac}}$  принимается в случае обработки вала, а знак «плюс» – отверстия.

Как показывает опыт, статистическая настройка не создает условий для получения точности заготовок выше 8 – 9 квалитетов. Это приводит к необходимости дополнять статистическую настройку динамической настройкой, проводя добавочное регулирование положения инструментов и упоров при обработке первых заготовок партии.

## 2. Использование калибров и универсальных мерительных средств

В настоящее время широкое распространение получил метод настройки по тому же калибру, которым пользуется в дальнейшем рабочий при обработке изделия. После настройки рабочий должен изготовить одну или несколько заготовок. Если размеры находятся в пределах допусков, предусмотренных рабочим калибром, то настройка считается правильной и разрешается обработка всей партии заготовок.

Такой метод настройки нельзя считать удовлетворительным, так как даже в наиболее благоприятном случае, когда допуск на обработку значительно превосходит поле рассеяния, нет гарантии того, что значительная часть заготовок партии не окажется за пределами установленного допуска. Кривая рассеяния, которой принадлежит размер пробной заготовки, может занимать внутри поля допуска  $T_0$  различные положения, и при изготовлении одной пробной заготовки нельзя определить, какому участку поля рассеяния она соответствует. Так, например, точки  $A$  и  $B$  (рис. 44) могут принадлежать кривым 1 и 2, расположение которых исключает опасность брака, но могут также относиться к кривым 1а и 2а, в значительной части выходящим за пределы допуска и связанным с появлением большого количества брака (заштрихованные участки).



При увеличении числа пробных заготовок вероятность появления значительного брака снижается, однако опасность появления брака не устраняется.

Для исключения опасности появления брака в случае, когда поле допуска превышает поле рассеяния, необходимо с помощью настройки обеспечить расположение кривой фактического распределения размеров внутри поля допуска с таким расчетом, чтобы ее центр группирования (математическое ожидание  $\mu$ ) отстоял от предельных размеров не менее чем на  $3\sigma$  (рис. 1). Методом настройки оборудования по рабочим калибрам при небольшом числе пробных заготовок эту задачу решить нельзя. Более рациональным является метод настройки с помощью универсальных мерительных средств по суженным допускам.

При использовании универсальных мерительных средств настройка оборудования заключается в том, что установка инструментов и упоров производится на определенный рабочий настроечный размер  $L_n$ , а правильность настройки устанавливается обработкой некоторого количества  $m$  пробных заготовок. Настройка признается правильной, если среднее арифметическое размеров пробных заготовок находится в пределах некоторого допуска  $T_n$  на настройку. Задачей расчета настройки в этом случае является определение поля допуска  $T_n$  для некоторой совокупности заготовок, распределение размеров которых подчиняется нормальному закону.

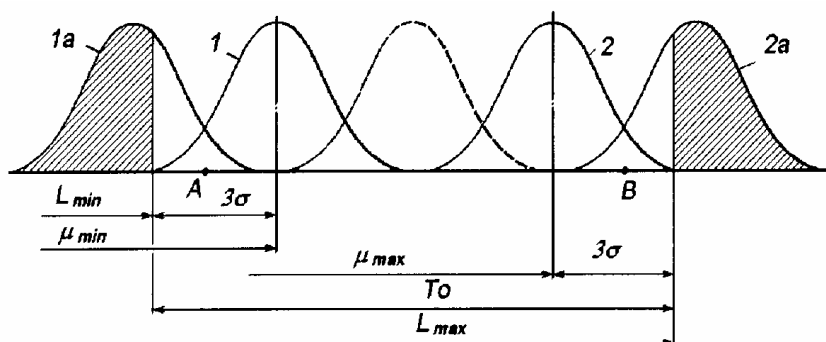


Рис. 1. Возможные положения кривых распределения размеров относительно поля допуска

Если центр группирования размеров пробных заготовок располагается по отношению к предельным размерам партии заготовок ближе чем на расстоянии  $3\sigma$  (точка M на рис. 2, а), то часть общей кривой рассеяния размеров обработанной партии заготовок может выйти за пределы допуска и возникает опасность появления брака.

Даже если это расстояние меньше  $3\sigma$  (точка M на рис. 2, б), то брак обработанных заготовок возможен, так как точка M может принадлежать

кривой групповых средних, центр группирования которых смещен на величину  $P$  (см. рис. 2, б) от требуемого положения кривой, исключающего возможность брака.

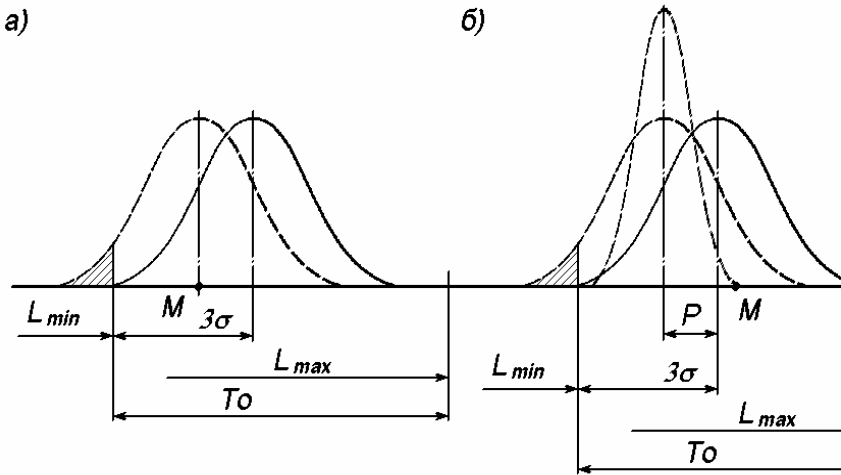


Рис. 2. Случаи возможного брака

Брак невозможен только в том случае (рис. 3), когда минимальный размер групповых средних пробных заготовок, определяющий положение точки  $M$ ,

$$L_{\min}^{cp} \geq L_{\min} + 3\sigma + 3\sigma/\sqrt{m},$$

а максимальный размер

$$L_{\max}^{cp} \leq L_{\max} - 3\sigma - 3\sigma/\sqrt{m}.$$

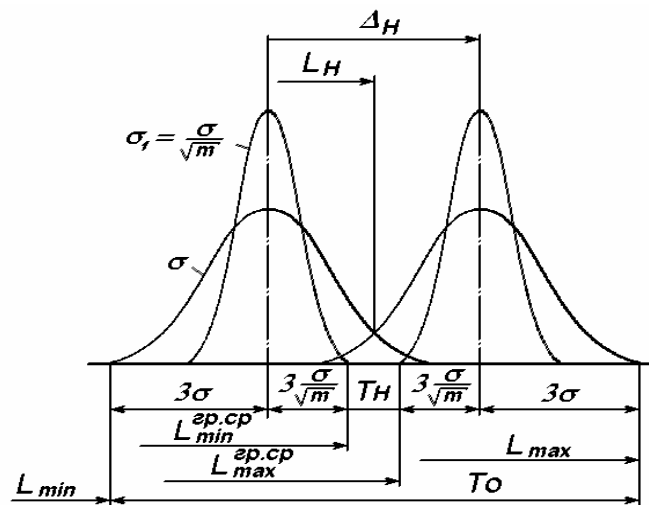


Рис. 3. Настройка оборудования, исключающая возможность брака

Разность предельных значений групповых средних размеров определяет величину допуска настройки

$$T_n = L_{\max}^{zp.cp} - L_{\min}^{zp.cp} = T_o - 6\sigma(1 + 1/\sqrt{m})$$

и зависит от общего допуска на обработку партии заготовок  $T_o$  и от количества  $m$  пробных заготовок.

Увеличивая число  $m$  пробных заготовок, можно расширить допуск настройки  $T_n$ , поэтому пользуются формулой

$$m > [6\sigma/(T_o - 6\sigma)]^2.$$

Условие обработки заготовок без брака при отсутствии влияния систематических погрешностей представляется выражением

$$6\sigma(1 + 1/\sqrt{m}) + T_n < T_o.$$

В общем случае, когда систематические погрешности оказывают существенное влияние на точность обработки заготовок, условие обработки заготовок без брака приобретает вид

$$6\sigma(1 + 1/\sqrt{m}) + T_n + \Delta_{сист} < T_o.$$

Допуск  $T_n$  настройки представляет собой разрешенное колебание значений групповых средних, вызываемое погрешностями регулирования и измерения. Являясь частью общей погрешности настройки, настроечный размер определяется выражением

$$L = \frac{L_{\min} + L_{\max}}{2} \pm 0,5T.$$

### 3. Настройка с учетом систематических погрешностей

Часто при настройке оборудования возникает задача наиболее рационального расположения кривой рассеяния в поле допуска с целью использования значительной части этого поля для компенсации переменных систематических погрешностей обработки, чтобы увеличить длительность работы оборудования без поднастройки.

Схема рациональной настройки для обеспечения заданной точности охватываемого размера (рис. 4) показывает, что некоторая часть  $T_n$  общего поля допуска  $T_o$  используется для компенсации погрешности настройки. Вторая часть общего поля допуска, определяемая величиной  $6\sigma(1 + 1/\sqrt{m})$ , предназначена для компенсации случайных погрешностей, вызывающих рассеяние размеров. Остальная часть  $b$  общего поля

допуска используется для компенсации погрешностей, порождаемых совокупным влиянием систематически действующих факторов, постоянных по величине и изменяющихся во времени по определенным законам.

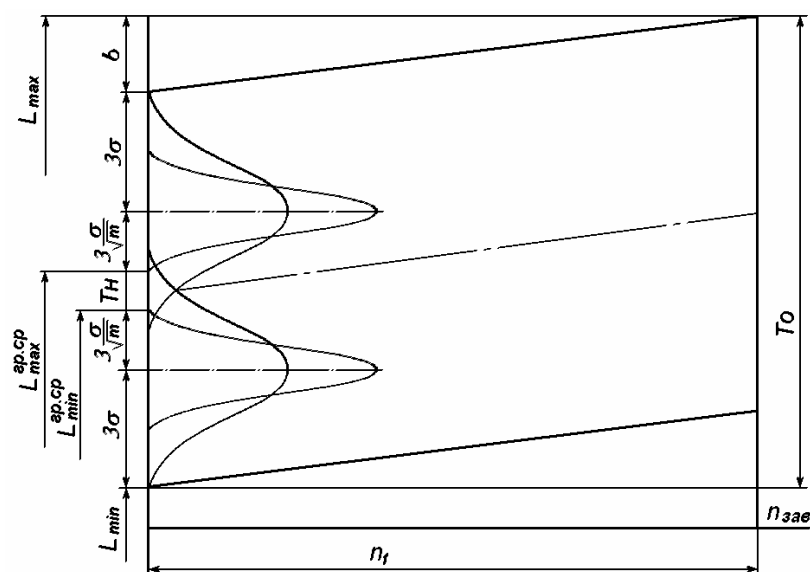


Рис. 4. Настройка оборудования с учетом переменных систематических погрешностей

В процессе обработки партии заготовок происходит изменение положения кривой рассеяния. После обработки некоторого количества  $n_1$  заготовок кривая рассеяния размеров заготовок пересекает линию наибольшего предельного размера и возникает опасность появления брака. В этот момент следует произвести поднастройку, чтобы кривая рассеяния возвратилась вниз в свое исходное положение, созданное первоначальной настройкой.

При такой настройке нельзя определять настроечный групповой средний размер по величине среднего арифметического, а необходимо вычислить его по значениям предельных размеров. Целесообразно (см. рис. 4), чтобы минимальное значение группового среднего размера удовлетворяло выражению

$$L_{\min}^{sp.cp} = L_{\min} + 3\sigma(1 + 1/\sqrt{m}).$$

При наличии существенного влияния переменных систематических погрешностей, уменьшающих размеры охватываемых заготовок, необходимо дополнительно ввести возможную величину погрешности  $a$ :

$$L_{\min}^{sp.cp} = L_{\min} + a + 3\sigma(1 + 1/\sqrt{m}).$$

В большинстве случаев обработки заготовок значение погрешности  $a$  ничтожно мало и расчет наименьшего настроечного размера производится без ее учета.

Формула для подсчета максимального значения группового среднего размера с учетом части допуска  $b$ , используемой для компенсации переменных систематических погрешностей, имеет вид

$$L_{\max}^{zp.cp} = L_{\max} - b - 3\sigma(1 + 1/\sqrt{m}).$$

Допуск на настройку определяется разностью предельных значений групповых средних размеров

$$T_n = L_{\max}^{zp.cp} - L_{\min}^{zp.cp} = T_o - 6\sigma(1 + 1/\sqrt{m}) - b - a.$$

Следовательно, при увеличении  $T_n$  с целью упрощения и ускорения настройки при прочих равных условиях приходится сокращать величину  $b$ , что приводит к возрастанию необходимых поднастроек.

При расчете настройки оборудования для случая обработки вала с учетом переменных систематических погрешностей удобно придерживаться следующей последовательности: 1) определить  $L_{\min}^{zp.cp}$ ; 2) вычислить минимально необходимую для данной операции величину  $T_n$ ; 3) определить значение  $L_{\max}^{zp.cp} = L_{\min}^{zp.cp} + T_n$ ; 4) вычислить часть допуска  $b$ , предназначенную для компенсации систематических погрешностей,

$$b = T_o - 6\sigma(1 + 1/\sqrt{m}) - T_n - a.$$

Если условие обработки заготовок без брака не выполнено и сумма случайных и систематических погрешностей оказывается больше поля допуска, т.е.

$$6\sigma(1 + 1/\sqrt{m}) + T_n + \Delta_{сист} > T_o,$$

то при обработке заготовок возможен брак.

При отсутствии возможности повысить точность операции настройку оборудования следует производить с таким расчетом, чтобы полученный брак оказался исправимым при дальнейшей обработке заготовок (рис. 5, а). Если исправить брак невозможно, настройку оборудования необходимо производить с учетом получения минимального количества возможного окончательного брака (см. рис. 5, б).

Количество возможного брака в этом случае определяется коэффициентом риска

$$t_o = x_o / \sigma,$$

для которого  $x_o$  вычисляется по формуле

$$x_o = (T_o - T_n - 6\sigma/\sqrt{m}) / 2.$$

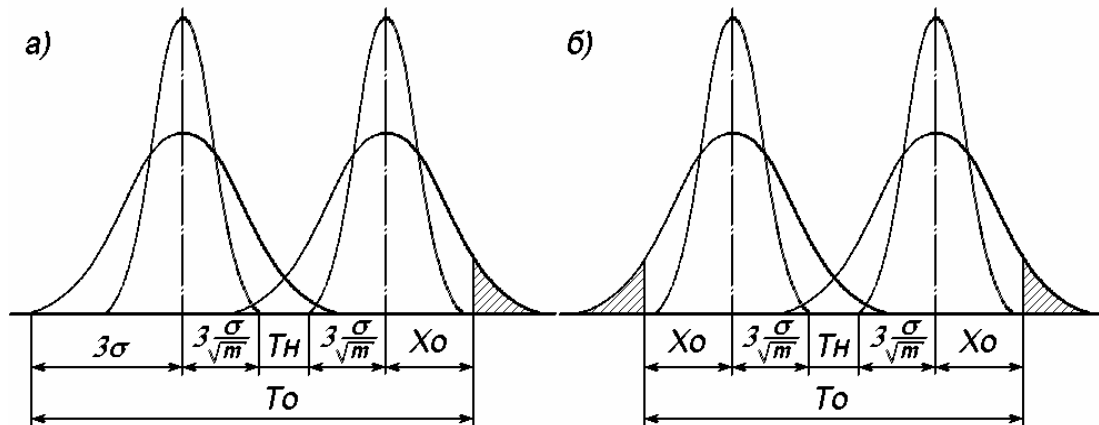


Рис. 5. Настойка оборудования для обработки с заведомым браком, учитывающая погрешность настройки

Решение о настройке оборудования с заведомо возможным исправимым или неисправимым браком принимается на основании расчета экономической эффективности обработки.

#### 4. Оценивание взаимосвязей и влияния факторов совмещенной обработки

Внедрение всеобщего управления качеством требует с высокой эффективностью использовать статистические методы контроля, наиболее широкое применение среди которых нашли: контрольный листок, гистограмма, диаграмма рассеяния (или поле корреляции), расслоение (или стратификация), диаграмма Парето, диаграмма «причины – результат» и контрольная карта, а также планы выборок и контроля, оценивание и парные сравнения, корреляция рангов и конкордация.

Для изучения путей управления технологическим процессом рассмотрим метод совмещенной обработки – наплавку с поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающий не только формирование поверхности детали с улучшенными геометрическими параметрами, но и упрочнение поверхностного слоя, повышение его физико-механических характеристик.

Исследуем зависимости регламентируемых параметров обработки – эксплуатационного  $Y_1 = \varepsilon_H$  – относительной износостойкости; физико-механического  $Y_2 = HRC$  – твердости; геометрического  $Y_3 = Ra$  – шероховатости и производительности обработки  $Y_4 = Q$  от основных технологи-

ческих факторов – усилия деформирования  $X_1 = P$ , подачи инструмента  $X_2 = S$ , силы разрядного тока  $X_3 = I$ , скорости вращения детали  $X_4 = v$  и магнитной индукции в рабочем зазоре  $X_5 = B$ .

Диаграммы рассеяния параметров  $Y_1, \dots, Y_4$  показывают отсутствие их линейной корреляции с технологическими факторами  $X_1, \dots, X_5$ , а результаты расслоения гистограмм  $Y_1, \dots, Y_4$  по факторам не позволяют существенно снизить дисперсию, что указывает на тесную взаимосвязь  $X_1, \dots, X_5$ . Поэтому в качестве статистической модели обработки применяются квадратичные функции, а для их построения и оценивания используется дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализ. Уравнения квадратичной регрессии  $Y_i = f(X_j)$  получают с помощью математического планирования экспериментов, для которого вследствие существенной нелинейности  $Y_1, \dots, Y_4$  и тесной корреляции  $X_1, \dots, X_5$  применяется центральный композиционный рототабельный униформ-план (ЦКРУП) второго порядка (табл. 1).

Таблица 1

**Матрица ЦКРУП второго порядка**

№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	№	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	+	+	+	+	+	9	+	+	+	-	-	17	+2	0	0	0	0	25	0	0	0	0	+2
2	-	+	+	+	-	10	-	+	+	-	+	18	-2	0	0	0	0	26	0	0	0	0	-2
3	+	-	+	+	-	11	+	-	+	-	+	19	0	+2	0	0	0	27	0	0	0	0	0
4	-	-	+	+	+	12	-	-	+	-	-	20	0	-2	0	0	0	28	0	0	0	0	0
5	+	+	-	+	-	13	+	+	-	-	+	21	0	0	+2	0	0	29	0	0	0	0	0
6	-	+	-	+	+	14	-	+	-	-	-	22	0	0	-2	0	0	30	0	0	0	0	0
7	+	-	-	+	+	15	+	-	-	-	-	23	0	0	0	+2	0	31	0	0	0	0	0
8	-	-	-	+	-	16	-	-	-	-	+	24	0	0	0	-2	0	32	0	0	0	0	0

Значимость коэффициентов регрессий целесообразно определять по критерию Стьюдента, а адекватность моделей оценивать по критерию Фишера. Условия опытов представлены в табл. 2, а обработка их результатов позволяет получить уравнения регрессии, приведенные ниже.

## Условия опытов совмещенной обработки

Уровни факторов $X_i$	Технологические факторы				
	$P, H$	$S, \text{мм/об}$	$I, A$	$v, \text{м/с}$	$B, \text{Тл}$
-2	500	0,06	60	0,058	0,40
-1	750	0,18	80	0,069	0,60
0	1000	0,30	100	0,080	0,80
+1	1250	0,42	120	0,091	1,00
+2	1500	0,54	140	0,102	1,20

$$Y_1 = 1,43 + 0,28X_1 - 0,13X_2 + 0,37X_3 + 0,08X_4 + 0,14X_5 - 0,68X_1X_2 + 0,13X_1X_3 - 0,21X_1X_4 + 0,08X_1X_5 - 0,15X_2X_3 + 0,37X_2X_4 + 0,14X_2X_5 - 0,12X_3X_4 - 0,19X_3X_5 + 0,02X_4X_5 - 0,15X_1^2 - 0,15X_2^2 - 0,10X_3^2 - 0,02X_4^2 - 0,01X_5^2;$$

$$Y_2 = 40,51 + 1,33X_1 + 0,58X_2 + 1,84X_3 + 0,08X_4 + 1,50X_5 - 0,38X_1X_2 + 1,13X_1X_3 + 0,88X_1X_4 + 1,50X_1X_5 + 0,75X_2X_3 + 0,25X_2X_4 + 1,63X_2X_5 - 0,75X_3X_4 - 0,88X_3X_5 - 0,13X_4X_5 - 0,58X_1^2 - 0,16X_2^2 - 1,06X_3^2 - 0,03X_4^2 - 0,59X_5^2;$$

$$Y_3 = 7,05 - 0,37X_1 + 0,46X_2 - 0,45X_3 - 0,35X_4 + 0,26X_5 - 0,43X_1X_2 + 0,35X_1X_3 + 0,07X_1X_4 + 0,29X_1X_5 - 0,42X_2X_3 + 0,90X_2X_4 + 0,34X_2X_5 - 0,87X_3X_4 - 0,44X_3X_5 - 0,15X_4X_5 - 0,47X_1^2 + 0,09X_2^2 + 0,21X_3^2 + 0,07X_4^2 + 0,22X_5^2;$$

$$Y_4 = 0,134 + 0,002X_1 - 0,074X_2 - 0,002X_3 - 0,014X_4 + 0,023X_5 - 0,002X_1X_2 + 0,002X_1X_3 - 0,007X_1X_4 + 0,013X_1X_5 + 0,011X_2X_3 - 0,002X_2X_4 + 0,006X_2X_5 - 0,12X_3X_4 + 0,008X_3X_5 - 0,004X_4X_5 - 0,0003^*X_1^2 - 0,015X_2^2 - 0,023X_3^2 - 0,005X_4^2 - 0,008X_5^2.$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессий, кроме отмеченного (\*), значимы с 90 %-ной доверительной вероятностью, и параметры всех моделей адекватны при 5 %-ном уровне значимости.

Анализ линейных членов математических моделей, полученных по диаграммам Парето (рис. 6), позволяет выявить степень влияния факторов на исследуемые параметры. Изучение членов, описывающих взаимодействие факторов на многоугольниках предпочтений (рис. 7), дает возможность определить значимость взаимной корреляции факторов по кривым Лоренца, в которых, в отличие от рис. 6,  $X_1, \dots, X_5$  ранжируются по возрастанию, а их значения, в отличие от рис. 7, разделены на 2 (чтобы в сумме получить 100 %).



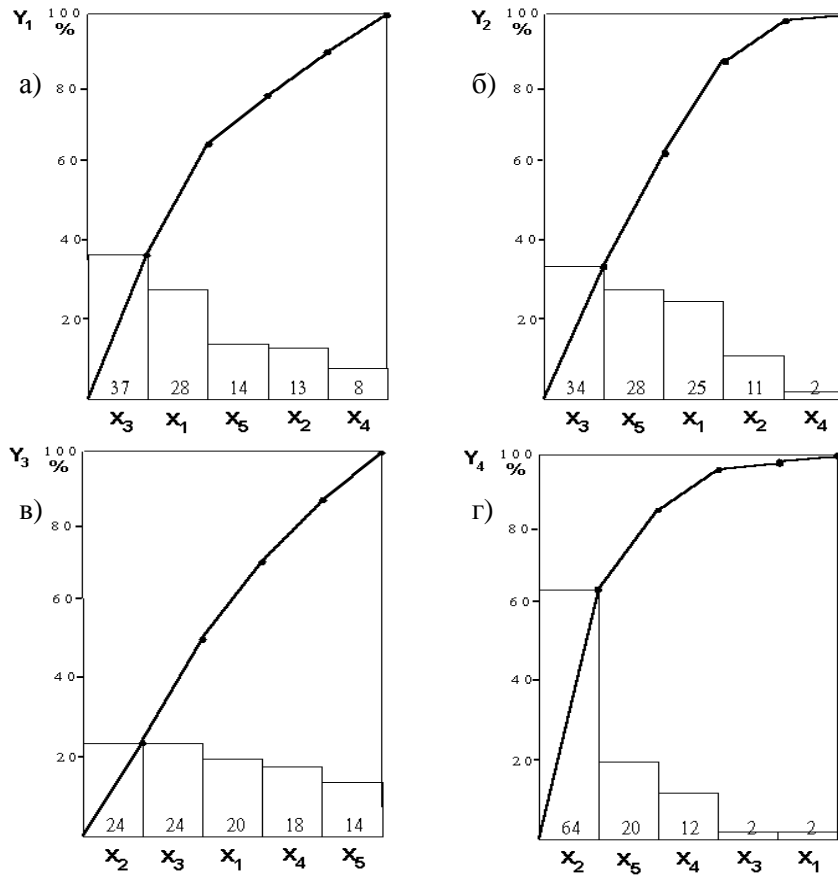


Рис. 6. Диаграммы Парето для параметров  $Y_1(a)$ ,  $Y_2(б)$ ,  $Y_3(в)$ ,  $Y_4(г)$

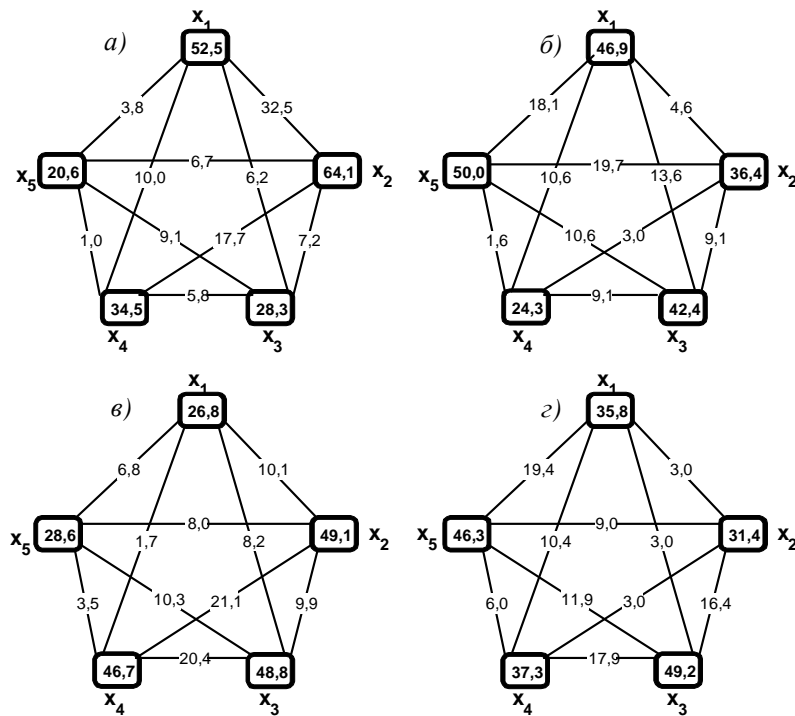


Рис. 7. Многоугольники предпочтений для параметров  $Y_1(a)$ ,  $Y_2(б)$ ,  $Y_3(в)$ ,  $Y_4(г)$

## 5. Управление параметрами и комплексная оптимизация процесса совмещенной обработки

Для различных параметров  $Y_1, \dots, Y_4$  с учетом степени влияния и значимости взаимной корреляции факторы  $X_1, \dots, X_5$  в порядке предпочтения ( $\rightarrow$ ) можно расположить в ряды (табл. 3). Так как для управления процессом целесообразно использовать наиболее влиятельные и наименее коррелированные с другими факторы, то из табл. 3 следует, что для управления параметрами  $Y_1, Y_2, Y_3$  наилучшим образом подходят факторы  $X_3$  и  $X_1$ , а также может использоваться  $X_5$ , а для  $Y_4$  подходят  $X_2$ , затем  $X_4$ , и может применяться  $X_5$ .

Таблица 3

**Степень влияния и взаимная корреляция факторов  
для различных параметров**

	Степень влияния	Взаимная корреляция
$Y_1$	$X_4 \rightarrow X_2 \rightarrow X_5 \rightarrow X_1 \rightarrow X_3$	$X_5 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1 \rightarrow X_2$
$Y_2$	$X_4 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_5$	$X_4 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_1 \rightarrow X_5$
$Y_3$	$X_5 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$	$X_1 \rightarrow X_5 \rightarrow X_4 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2$
$Y_4$	$X_1 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_5 \rightarrow X_2$	$X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow X_4 \rightarrow X_5 \rightarrow X_3$

Это полностью согласуется с результатами, полученными при анализе физических процессов совмещенной обработки. Эксплуатационным  $Y_1 = \epsilon_H$  и технологическими  $Y_2 = HRC$ ,  $Y_3 = Ra$  параметрами наиболее рационально управлять с помощью термомеханических факторов  $X_3 = I$ ,  $X_1 = P$ , а электромагнитные воздействия регулировать индукцией поля  $X_5 = B$ . Производительность  $Y_4 = Q$  в первую очередь определяется движениями подачи  $X_2 = S$ , затем скоростью детали  $X_4 = v$ , а расход наплавочного материала регулируется магнитной индукцией  $X_5 = B$ .

Факторы  $X_2 = S$  и  $X_4 = v$ , определяющие производительность  $Y_4 = Q$  (см. табл. 3), с малой корреляцией слабо влияют на твердость  $Y_2 = HRC$ , для шероховатости  $Y_3 = Ra$  их влияние и корреляция возрастают, а при переходе к производительности  $Y_4 = Q$  с ростом влияния корреляция падает. Используя метод парных сравнений, по рассмотренным предпочтениям параметров для степени взаимной корреляции факторов строим треугольники (рис. 8). С целью снятия противоречий для совпадения влиятельности и коррелированности факторов необходимо рассматривать предпочтение  $Y_4 \rightarrow Y_3$  со знаком « $\rightarrow$ » (см. рис. 8, б).

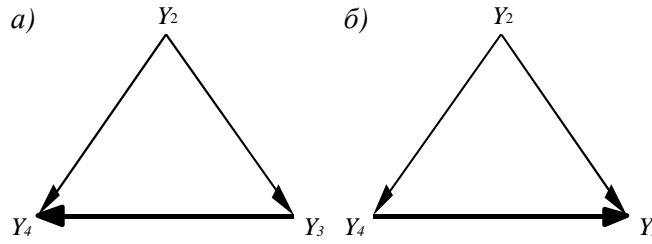


Рис. 8 Треугольники предпочтений параметров  $Y_2, Y_3, Y_4$  для влиятельности (а) и коррелированности (б) факторов  $X_2$  и  $X_4$

Полученный вывод подтверждается исследованием производительности совмещенной обработки и ее влияния на параметры качества. Установлено, что при обработке наблюдается отрицательная обратная связь шероховатости  $Y_3 = Ra$  поверхности с ее твердостью  $Y_2 = HRC$  через производительность обработки  $Y_4 = Q$ . Этой низкой производительности  $Q$ , обеспечивающей стабилизацию процесса, соответствуют наилучшие значения параметров  $HRC$  и  $Ra$ .

Эксплуатационный параметр  $Y_1 = \varepsilon_H$  – износостойкость, не рассматриваемый при оперативном регулировании технологического процесса (см. рис. 8), занимает промежуточное место между  $Y_2 = HRC$  – твердостью и  $Y_3 = Ra$  – шероховатостью (см. табл. 3) и во многом определяется этими параметрами.

Для комплексной оптимизации параметров качества регулируемого технологического процесса целесообразно использовать диаграмму «причины – результат» (рис. 9), для которой в качестве цели следует рассматривать обобщенную функцию желательности Харрингтона

$$Z = \sqrt[4]{d_1 \cdot \dots \cdot d_i \cdot \dots \cdot d_n},$$

в которой

$$d_i = \exp[-\exp(-Y_i^*)]$$

для  $i = 1, 2, 3, 4$ .

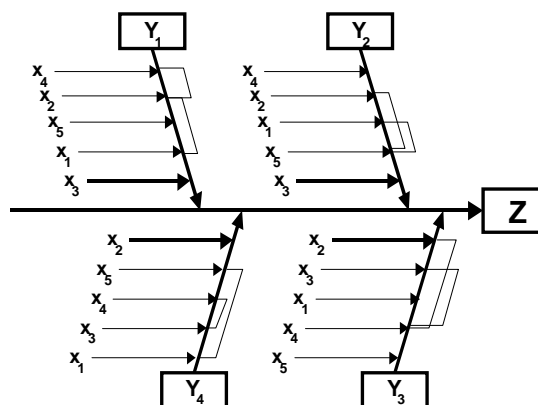


Рис. 9. Диаграмма «причины – результат» совмещенной обработки

Для желательностей  $d_i$  предлагались шкалы (рис. 10), составленные исходя из значимости параметров  $Y_1, \dots, Y_4$  и рассмотренных на диаграмме «причины – результат» возможностей их регулирования технологическими факторами  $X_1, \dots, X_5$ .

На диаграмме (см. рис. 9) в качестве главных причин указаны параметры  $Y_1, \dots, Y_4$ , которые, в свою очередь, обусловлены факторами  $X_1, \dots, X_5$ . Для каждой причины в порядке значимости согласно рис. 9 выделялись три первоочередных фактора и в соответствии с рис. 10 указывались две основные взаимосвязи.

Диаграмма показывает (см. рис. 9), что наиболее легко управляема производительность  $Y_4 = Q$ , далее следует эксплуатационный параметр – износостойкость  $Y_1 = \epsilon_H$ , определяемый технологическими параметрами – твердостью и шероховатостью поверхности  $Y_2 = HRC$  и  $Y_3 = Ra$ . Согласно этому ранжированию предложены регулируемые диапазоны параметров на шкалах желательностей (см. рис. 10).

Комплексную оптимизацию технологического процесса, представленного уравнениями регрессий, рационально проводить методом спирального координатного спуска по обобщенной функции  $Z$  и сравнивать с результатами оптимизации отдельных параметров  $Y_1, \dots, Y_4$  (табл. 4).

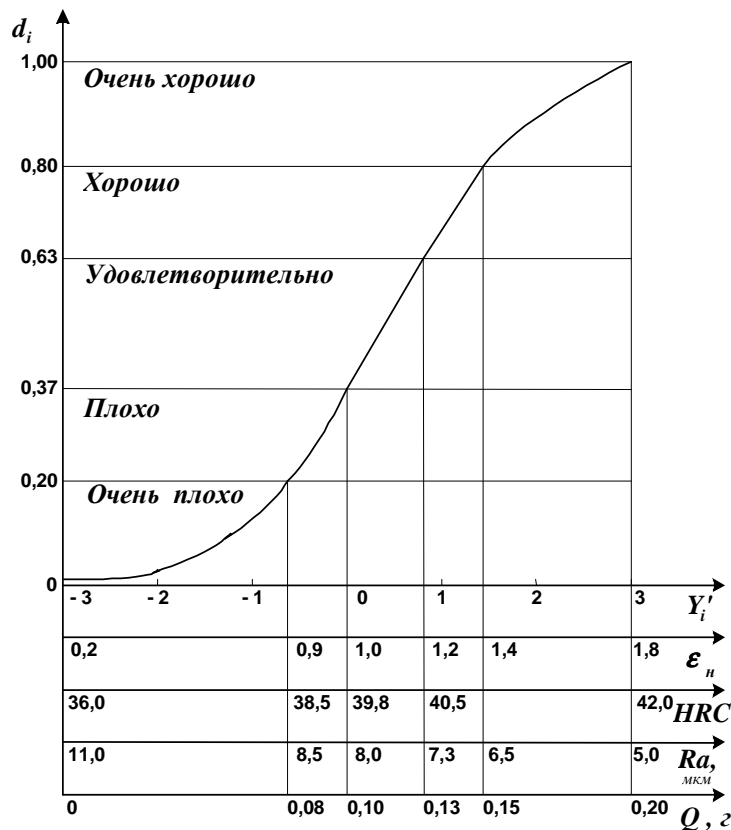


Рис. 10. Функция и шкалы желательности параметров оптимизации  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$

Результаты оптимизации технологических факторов  $X_1, \dots, X_5$  показывают, что отличия оптимальных режимов для комплекса параметров  $Z$  и параметра  $Y_4 = Q$  малы, а определяющие факторы  $X_3 = I$ ,  $X_1 = P$  и  $X_5 = B$  для оптимальных параметров  $Y_2 = HRC$  и  $Y_3 = Ra$  отличаются незначительно (см. табл. 4).

Таблица 4

**Значения технологических факторов при оптимальных величинах параметров  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Z$**

Параметры оптимизации		Технологические факторы									
		$X_1$	$P, H$	$X_2$	$S, \text{мм/об}$	$X_3$	$I, A$	$X_4$	$v, \text{м/с}$	$X_5$	$B, \text{Тл}$
$Y_1$	$\epsilon_H$	1,00	1250	0,20	0,32	2,00	140	0,20	0,082	0,20	0,84
$Y_2$	$HRC$	1,20	1300	0,50	0,36	1,80	136	0,20	0,082	2,00	1,20
$Y_3$	$Ra$	2,00	1500	2,00	0,54	1,50	110	0,20	0,082	0,20	0,84
$Y_4$	$Q$	2,00	1500	0,20	0,32	0,20	104	0,20	0,082	2,00	1,20
$Z$	$\epsilon_H, HRC, Ra, Q$	1,60	1400	0,20	0,32	0,60	112	0,20	0,082	1,40	1,08

Таким образом, для управления совмещенным технологическим процессом электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием можно рекомендовать:

- 1) регулирование производительности  $Y_4 = Q$ ;
- 2) статистический контроль технологических параметров  $Y_2 = HRC$  и  $Y_3 = Ra$  с помощью контрольных карт, проводя измерения после обработки;
- 3) экспресс-оценку твердости  $Y_2 = HRC$  коэрцитиметром непосредственно в процессе совмещенной обработки.

## **6. Оценивание взаимосвязей и влияния факторов комбинированной обработки**

Для обеспечения качества деталей необходимо управлять основными технологическими факторами обработки таким образом, чтобы получать требуемые значения контролируемых параметров процесса. Наиболее сложны в управлении комбинированные методы обработки, совмещающие в одном процессе различные технологические операции, а в рамках операции – разнообразные технологические воздействия.

Для изучения путей управления комбинированной обработкой рассмотрим упрочняющее ротационное резание с предварительным нагревом – оплавлением срезаемого слоя износостойкого покрытия, полученного плазменным напылением порошка.

Исследуем зависимости регламентируемых параметров обработки: физико-механических  $Y_1 = HRC$  – твердости и  $Y_2 = \mu$  – наклепа; геометрических  $Y_3 = Sm_w$  – волнистости и  $Y_4 = Ra$  – шероховатости; производительности  $Y_5 = u$ , определяемой отношением скорости дополнительного  $v_p$  и

главного  $v$  движения инструмента к основным технологическим факторам:  $X_1 = I$  – силе тока плазменной дуги,  $X_2 = L$  – расстоянию от пятна нагрева до режущей кромки инструмента,  $X_3 = S$  – скорости подачи инструмента,  $X_4 = v$  – скорости главного движения и  $X_5 = t$  – глубине резания.

Диаграммы рассеяния параметров  $Y_1, \dots, Y_5$  показывают отсутствие их линейной корреляции с технологическими факторами  $X_1, \dots, X_5$ , а результаты расслоения гистограмм  $Y_1, \dots, Y_5$  по факторам не позволяют существенно снизить дисперсию, что указывает на тесную взаимосвязь  $X_1, \dots, X_5$ .

Вследствие этого в качестве статистической модели обработки применяются квадратичные функции, а для их построения и оценивания используется дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализ. Уравнения квадратичной регрессии  $Y_i = f(X_j)$  получают с помощью планирования экспериментов, для которого вследствие существенной нелинейности  $Y_1, \dots, Y_5$  и тесной корреляции  $X_1, \dots, X_5$  применяют центральный композиционный рототабельный равномерный план (ЦКРУП) второго порядка (см. табл. 1).

Значимость коэффициентов регрессий определяют по критерию Стьюдента, адекватность моделей оценивают по критерию Фишера. Условия опытов представлены в табл. 5, обработка их результатов позволяет получить приведенные ниже уравнения регрессии.

$$Y_1 = 61,7098 - 1,6055X_1 - 0,4379X_2 + 0,5630X_3 + 1,1051X_4 + 0,1043X_5 + 0,2813X_1X_2 + 0,2813X_1X_3 + 0,5938X_1X_4 + 0,2813X_1X_5 - 0,7813X_2X_3 + 0,4063X_2X_4 + 0,4688X_2X_5 - 0,2188X_3X_4 - 0,7188X_3X_5 - 0,2188X_4X_5 - 1,3123X_1^2 - 1,2551X_2^2 - 1,0003X_3^2 - 1,7491X_4^2 - 1,0627X_5^2;$$

$$Y_2 = 2,9516 - 0,6901X_1 - 0,1722X_2 + 0,6134X_3 + 0,7318X_4 - 0,0179X_5 - 0,0944X_1X_2 + 0,1069X_1X_3 - 0,2631X_1X_4 + 1,3831X_1X_5 - 0,0531X_2X_3 - 0,2306X_2X_4 - 0,4469X_2X_5 - 0,4094X_3X_4 + 0,2869X_3X_5 + 0,4494X_4X_5 - 1,0386X_1^2 + 0,0160X_2^2 + 0,0547X_3^2 - 0,6267X_4^2 - 0,4171X_5^2;$$

$$Y_3 = 0,6425 + 0,0350X_1 - 0,0517X_2 - 0,0726X_3 + 0,0392X_4 + 0,0259X_5 - 0,0413X_1X_2 + 0,0150X_1X_3 + 0,0175X_1X_4 - 0,0163X_1X_5 - 0,1000X_2X_3 + 0,1275X_2X_4 + 0,0213X_2X_5 - 0,1138X_3X_4 - 0,0275X_3X_5 + 0,0500X_4X_5 - 0,0585X_1^2 + 0,1633X_2^2 + 0,0709X_3^2 + 0,0909X_4^2 + 0,0572X_5^2;$$

$$Y_4 = 4,6388 + 2,2731X_1 - 1,9168X_2 + 1,0921X_3 - 1,1388X_4 - 1,0304X_5 - 0,2369X_1X_2 + 0,7306X_1X_3 - 3,0519X_1X_4 + 1,3719X_1X_5 + 0,3419X_2X_3 - 0,5406X_2X_4 - 0,2194X_2X_5 + 0,1869X_3X_4 + 1,1944X_3X_5 + 0,0994X_4X_5 + 1,5926X_1^2 + 1,7786X_2^2 - 0,3309X_3^2 - 1,8098X_4^2 - 0,7739X_5^2;$$

$$Y_5 = 0,6502 - 0,0173X_1 + 0,0110X_2 + 0,0277X_3 - 0,0178X_4 + 0,0061X_5 - \\ - 0,0016X_1X_2 - 0,0009^*X_1X_3 + 0,0084X_1X_4 - 0,0093X_1X_5 - 0,0008^*X_2X_3 + \\ + 0,0053X_2X_4 + 0,0151X_2X_5 + 0,0269X_3X_4 + 0,0058X_3X_5 + 0,0068X_4X_5 - \\ - 0,0214X_1^2 - 0,0066X_2^2 - 0,0212X_3^2 - 0,0229X_4^2 - 0,0262X_5^2.$$

Выявлено, что все коэффициенты регрессий, кроме отмеченных (\*), значимы с 90 %-ной доверительной вероятностью, параметры моделей  $Y_1$ ,  $Y_4$ ,  $Y_5$  адекватны при 1 %-ном уровне значимости, а моделей  $Y_2$  и  $Y_3$  – при 5 %-ном.

Таблица 5

**Условия опытов комбинированной обработки**

Уровни факторов $X_i$	Технологические факторы				
	$L$ , мм	$S$ , мм/об	$I$ , А	$v$ , м/с	$t$ , мм
-2	40	0,097	60	0,9	0,05
-1	50	0,195	80	1,8	0,10
0	60	0,300	100	2,7	0,15
+1	70	0,390	120	3,6	0,20
+2	80	0,520	140	4,5	0,25

Анализ линейных членов полученных моделей по диаграммам Парето (рис. 11) позволяет выявить степень влияния факторов на исследуемые параметры. Изучение членов, описывающих взаимодействие факторов на многоугольниках предпочтений (рис. 12), дает возможность определить значимость взаимной корреляции факторов по кривым Лоренца, в которых, в отличие от диаграмм Парето,  $X_1, \dots, X_5$  ранжируются по возрастанию, а их значения разделены на 2 (чтобы в сумме получить 100 %).

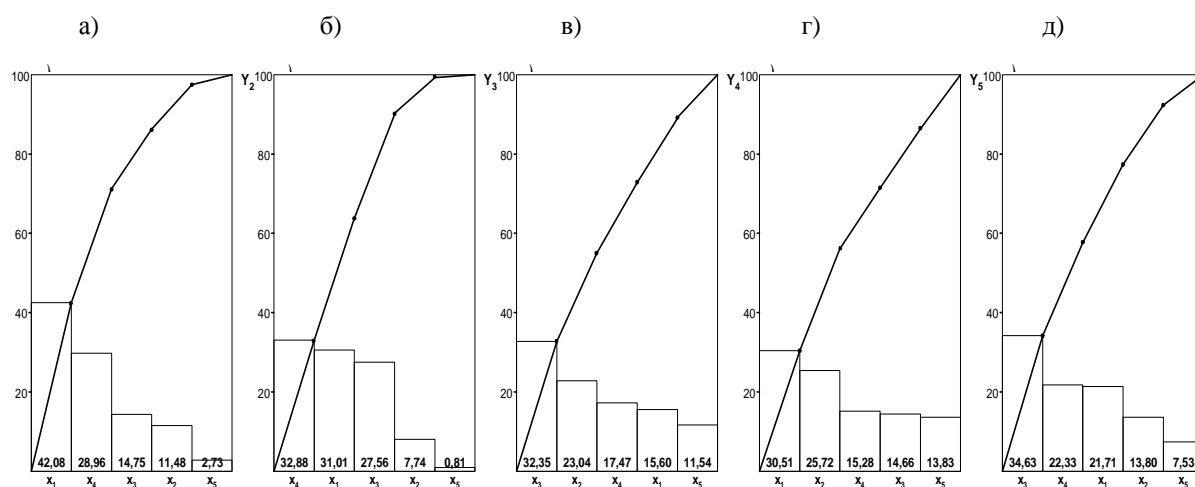


Рис. 11. Диаграммы Парето для параметров  $Y_1$  (а),  $Y_2$  (б),  $Y_3$  (в),  $Y_4$  (г),  $Y_5$  (д)

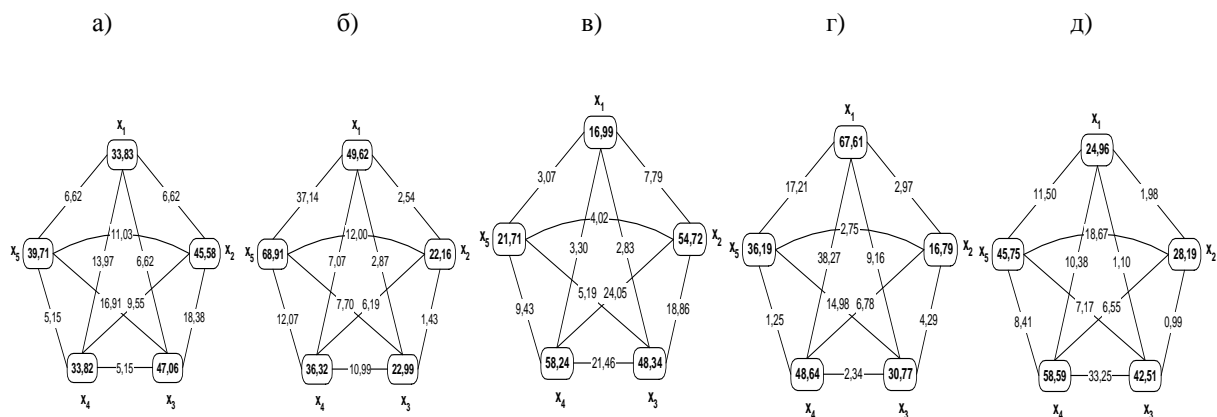


Рис. 12. Многогранники предпочтений для параметров  $Y_1$  (а),  $Y_2$  (б),  $Y_3$  (в),  $Y_4$  (г),  $Y_5$  (д)

## 7. Управление параметрами и комплексная оптимизация процесса комбинированной обработки

Для параметров  $Y_1, \dots, Y_5$  с учетом степени влияния и значимости взаимной корреляции факторы  $X_1, \dots, X_5$  в порядке предпочтения ( $\rightarrow$ ) можно расположить в ряды (табл. б). Для управления процессом целесообразно использовать наиболее влиятельные и наименее коррелированные с другими факторы, следовательно (табл. б), для управления параметрами  $Y_1, Y_2, Y_5$  наилучшим образом подходят факторы  $X_1, X_4$ , и может использоваться  $X_3$ , а для  $Y_3, Y_4$  подходят  $X_2$  и  $X_3$ , а также  $X_5$ .

Таблица б

Степень влияния и взаимная корреляция факторов для различных параметров

	Степень влияния	Взаимная корреляция
$Y_1$	$X_5 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1$	$X_4 \rightarrow X_1 \rightarrow X_5 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$
$Y_2$	$X_5 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_1 \rightarrow X_4$	$X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1 \rightarrow X_5$
$Y_3$	$X_5 \rightarrow X_1 \rightarrow X_4 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$	$X_1 \rightarrow X_5 \rightarrow X_3 \rightarrow X_2 \rightarrow X_4$
$Y_4$	$X_5 \rightarrow X_3 \rightarrow X_4 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1$	$X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_5 \rightarrow X_4 \rightarrow X_1$
$Y_5$	$X_5 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1 \rightarrow X_4 \rightarrow X_3$	$X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3 \rightarrow X_5 \rightarrow X_4$

Это согласуется с результатами, полученными при исследовании физических процессов комбинированной обработки. Физико-механическими  $Y_1 = HRC$ ,  $Y_2 = \mu$  параметрами наиболее рационально управлять с помощью термомеханических факторов  $X_1 = I$ ,  $X_4 = v$ , а также  $X_3 = S$ , геометрически  $Y_3 = Sm_w$  и  $Y_4 = Ra$  – путем рационального размещения инструмента, используя факторы  $X_2 = L$  и  $X_3 = S$ , а также регулируя жесткость его контакта



с обрабатываемым материалом, посредством нагрева  $X_1 = I$ . Производительность  $Y_5 = u$  в первую очередь определяется движениями подачи  $X_3 = S$ , затем скоростью детали  $X_4 = v$  и регулируется интенсивностью нагрева  $X_1 = I$ .

Факторы  $X_3 = S$  и  $X_4 = v$ , определяющие производительность  $Y_5 = u$  (табл. 6), с малой корреляцией слабо влияют на шероховатость  $Y_4 = Ra$ , для твердости  $Y_1 = HRC$  их влияние и корреляция возрастают, и при переходе к производительности  $Y_5 = u$  с ростом влияния корреляция также возрастает. Используя метод парных сравнений, по рассмотренным предпочтениям параметров строим треугольники, которые совпадают как для влияния (рис. 13, а), так и для коррелированности (см. рис. 13, б) факторов.

Полученные зависимости подтверждаются исследованием производительности обработки и ее влияния на технологические параметры качества. Так, установлено, что при ротационном резании с предварительным нагревом наблюдается положительная обратная связь твердости  $Y_1 = HRC$  поверхности с ее шероховатостью  $Y_4 = Ra$  через производительность обработки  $Y_5 = u$ . При этой высокой производительности  $u$ , обеспечивающей стабилизацию процесса, получают наилучшие значения параметров  $Ra$  и  $HRC$ .

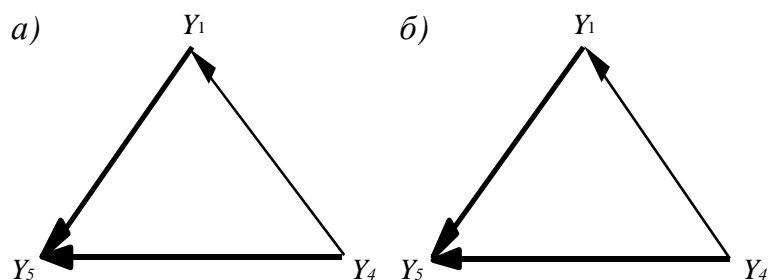


Рис. 13. Треугольники предпочтений параметров  $Y_1, Y_4, Y_5$  для влияния (а) и коррелированности (б) факторов  $X_3$  и  $X_4$

Параметры  $Y_1 = \mu$  – наклеп и  $Y_3 = Sm_w$  – волнистость поверхности, не рассматриваемые при оперативном регулировании технологического процесса, тесно коррелируют с  $Y_1 = HRC$  – твердостью и  $Y_4 = Ra$  – шероховатостью (см. табл. 6).

Для комплексной оптимизации параметров качества комбинированной обработки целесообразно использовать диаграмму «причины – результат» (рис. 14), для которой в качестве цели следует рассматривать обобщенную функцию желательности Харрингтона.

Для желательностей  $d_i$  предлагались шкалы (рис. 15), составленные исходя из значимости параметров  $Y_1, \dots, Y_5$  и рассмотренных на диаграмме «причины – результат» возможностей их регулирования технологическими факторами  $X_1, \dots, X_5$ .

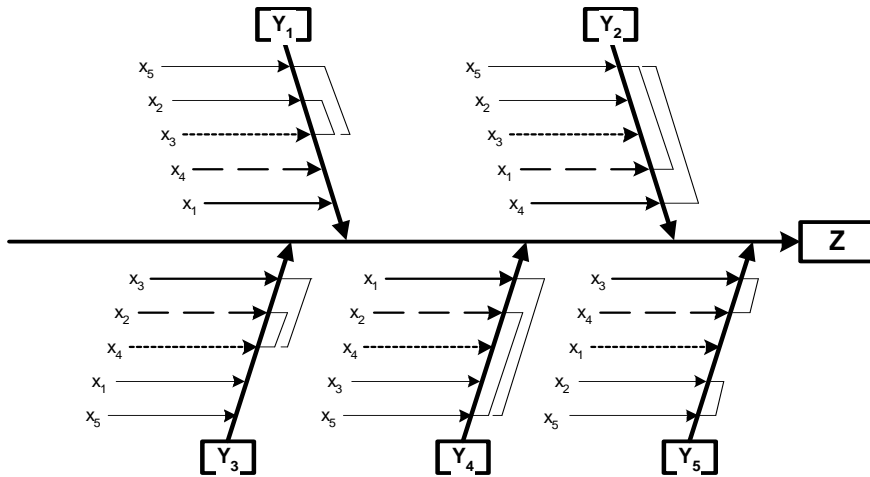


Рис. 14. Диаграмма «причины – результат» комбинированной обработки

На диаграмме «причины – результат» в качестве главных причин указывались параметры  $Y_1, \dots, Y_5$ , которые, в свою очередь, обусловлены факторами  $X_1, \dots, X_5$  (рис. 14). Для каждой причины в порядке значимости выделялись три первоочередные фактора и указывались две основные взаимосвязи.

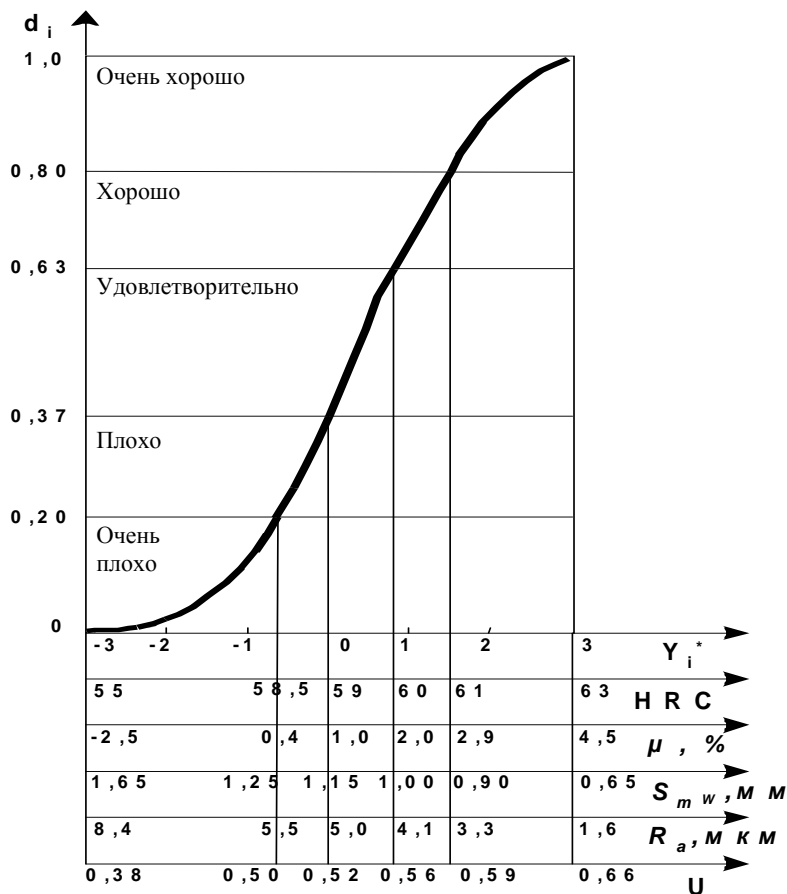


Рис. 15. Функция и шкалы желательности параметров оптимизации  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5$

Диаграмма (см. рис. 14) показывает, что наиболее легко управляемы твердость  $Y_1 = HRC$  и наклеп поверхности  $Y_2 = \mu$ , далее следует производительность  $Y_5 = u$ , определяемая скоростями перемещений кромки инструмента. Согласно этому ранжированию предложены диапазоны параметров на шкалах желательностей (см. рис. 15).

Комплексную оптимизацию процесса комбинированной обработки целесообразно проводить методом спирального координатного спуска по обобщенной функции  $Z$ . Результаты оптимизации позволяют рекомендовать следующие режимы обработки:  $X_1 = I = 98,4$  А;  $X_2 = L = 64,2$  мм;  $X_3 = S = 0,28$  мм/об;  $X_4 = v = 3,0$  м/с;  $X_5 = t = 0,16$  мм, при которых функция желательности принимает максимальное значение  $Z = 0,87$ , а параметры качества обрабатываемой поверхности:  $Y_1 = HRC = 61,5$ ;  $Y_2 = \mu = 2,9$  %;  $Y_3 = Sm_w = 0,66$  мм;  $Y_4 = Ra = 3,29$  мкм при соотношении скоростей режущей кромки инструмента  $Y_5 = u = v_p/v = 0,64$ .

Таким образом, для управления комбинированным процессом упрочняющего ротационного резания с предварительным нагревом – оплавлением срезаемого слоя износостойкого покрытия с целью обеспечения оптимальных параметров качества обработки можно рекомендовать:

1) регулирование интенсивности нагрева  $X_1 = I$ , скоростей обработки  $X_4 = v$  и  $X_3 = S$  с наблюдением за изменением скорости дополнительного перемещения режущей кромки инструмента  $v_p$ , оцениваемой  $Y_5 = u$ ;

2) статистический контроль физико-механического  $Y_1 = HRC$  и геометрического  $Y_4 = Ra$  параметров с помощью контрольных карт (измерения проводятся после операции);

3) экспресс-оценку твердости  $Y_1 = HRC$  коэрцитиметром непосредственно в процессе обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Республики Беларусь «О защите прав потребителей» № 90-3 от 19.01.2002.
2. Закон Республики Беларусь «Об оценке соответствия техническим нормативным правовым актам в области технического нормирования и стандартизации» № 269-3 от 05.01.2004.
3. Закон Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации» № 262-3 от 05.01.2004.
4. Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» № 163-3 от 26.07.2006.
5. ТКП 1.0-2004. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила разработки технических регламентов.
6. ТКП 1.1-2004. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила разработки технических кодексов установившейся практики.
7. ТКП 1.2-2004. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила разработки государственных стандартов.
8. ТКП 1.3-2004. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила разработки технических условий.
9. ТКП 1.4-2006. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила опубликования технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации и информации о них.
10. ТКП 1.5-2004. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила построения, изложения, оформления и содержания технических кодексов установившейся практики и государственных стандартов.
11. ТКП 1.6-2006. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила планирования работ по техническому нормированию и стандартизации.
12. ТКП 1.7-2007. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила разработки межгосударственных стандартов.
13. ТКП 1.9-2007. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила принятия международных, региональных и национальных стандартов других государств в качестве государственных стандартов.
14. ТКП 1.10-2007. Система технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь. Правила построения, изложения, оформления и содержания технических регламентов.
15. ТКП 5.1.01-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Основные положения.
16. ТКП 5.1.01-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Основные положения.
17. ТКП 5.1.02-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Порядок сертификации продукции. Основные положения.
18. ТКП 5.1.03-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Порядок декларирования соответствия продукции. Основные положения.

19. ТКП 5.1.04-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Порядок сертификации услуг. Основные положения.
20. ТКП 5.1.05-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Порядок сертификации систем менеджмента качества. Основные положения.
21. ТКП 5.1.06-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Порядок сертификации компетентности персонала. Основные положения.
22. ТКП 5.1.08-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Правила маркировки знаком соответствия. Основные положения.
22. ТКП 5.1.08-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Правила маркировки знаком соответствия. Основные положения.
23. ТКП 5.1.09-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Порядок сертификации экспертов-аудиторов по качеству.
23. ТКП 5.1.10-2004. Национальная система подтверждения соответствия Республики Беларусь. Порядок ведения реестра.
26. РД 3.01-93. Маркетинговая деятельность. Основные положения.
27. РД 3.02-93. Рекомендации по применению статистических методов управления качеством продукции.
28. РД 3.03-93. Рекомендации по разработке политики в области качества.
29. РД 3.05-93. Рекомендации по учету и анализу затрат на качество продукции.
30. ИСО 8402:1994. Управление качеством и обеспечение качества: словарь.
31. Руководство ИСО/МЭК 2:1996. Общие термины и определения в области стандартизации и смежных видов деятельности.
32. Деминг, Э. Выход из кризиса / Э. Деминг. – Тверь, 1994.
33. Фейгенбаум, А. Контроль качества продукции / А. Фейгенбаум, В. Арманд. – М.: Экономика, 1986.
34. Харрингтон, Дж. Х. Управление качеством в американских корпорациях / Дж. Х. Харрингтон. – М.: Экономика, 1990.
35. Исикава, К. Японские методы управления качеством / К. Исикава. – М.: Экономика, 1988.
36. Статистические методы повышения качества / под ред. Х. Куме. – М.: Финансы и статистика, 1990.
37. Контроль качества с помощью персональных компьютеров / Т. Макино [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991.
38. Миттаг, Х.-Й. Статистические методы обеспечения качества / Х.-Й. Миттаг, Х. Ринне. – М.: Машиностроение, 1995.
39. Крылова, Г.Д. Зарубежный опыт управления качеством / Г.Д. Крылова. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
40. Крылова, Г.Д. Основы стандартизации, сертификации и метрологии / Г.Д. Крылова. – М.: ЮНИТИ, 1998.

41. Управление качеством продукции: справочник / под ред. В.В. Бойцова, А.В. Гличева. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
42. Окрепилов, В.В. Всеобщее управление качеством: учебник / В.В. Окрепилов. – СПб.: СПбУЭФ, 1996.
43. Парфеновский, А.Б. Управление качеством продукции / А.Б. Парфеновский, А.Я. Лукашин. – М.: Экономика, 1986.
44. Волков, С.С. Управление качеством продукции средствами активного контроля / С.С. Волков, Э.Ш. Гейлер. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
45. Ряполов, А.Ф. Сертификация. Методология и практика / А.Ф. Ряполов. – М.: Изд-во стандартов, 1987.
46. Медведев, А.М. Международная стандартизация и сертификация продукции / А.М. Медведев, А.Ф. Ряполов. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
47. Волосов, С.С. Управление качеством продукции средствами активного контроля / С.С. Волосов, Э.Ш. Гейлер. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 264 с.
48. Маталин, А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
49. Ящерицын, П.И. Планирование эксперимента в машиностроении / П.И. Ящерицын, Е.И. Махаринский. – Минск: Выш. шк., 1985. – 286 с.
50. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980 – 304 с.
51. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 640 с.
52. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
53. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
54. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 268 с.
55. Обработка износостойких покрытий / Л.М. Кожуро [и др.]. – Минск: Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.
56. Корешков, В.Н. Управление качеством и сертификация продукции: справ. пособие / В.Н. Корешков, Н.А. Кусакин, М.Л. Хейфец. – Минск: БелГИСС; Новополоцк: ПГУ, 1999. – 64 с.: ил.
57. Статистические методы управления качеством: справ. пособие / Н.А. Кусакин [и др.]. – Минск: БелГИСС; Новополоцк: ПГУ, 2000. – 56 с.: ил.
58. Основы системы менеджмента качества машиностроительного предприятия / В.И. Арбузов [и др.]. – Минск: Технопринт, 2000. – 280 с.

## Лабораторная работа № 2

### Организация испытаний РЭС на климатические воздействия (испытания на работоспособность изделий при статическом воздействии пыли)

**Цель работы:** изучить содержание программы испытаний; методику испытаний; особенности программы испытаний; общие требования к испытательному оборудованию и правила оформления документации по результатам испытаний.

#### 1. Организация и проведение испытаний

Предпосылкой для организации испытаний является всестороннее изучение объекта испытаний и документации, определяющей характер, содержание и последовательность испытаний. Такими документами являются технические условия (ТУ), технические требования (ТТ), стандарты, которые могут быть уточнены в процессе производства и эксплуатации аппаратуры.

Основными документами, определяющими испытания, являются программа (ПИ) и методика испытаний.

Программа испытаний включает следующие моменты: цель испытания; контролируемые параметры; воздействия и их последовательность; параметры испытательных режимов; режимы работы РЭА; определение критерия отказа и неисправности (по постепенным и внезапным отказам); план испытаний, определяющий количество испытываемых изделий; продолжительность; решающее правило; точность и долговечность оценки.

К программе испытаний должна прилагаться методика испытаний, включающая методологические вопросы проведения испытаний.

Методика определяет перечень и типы испытательного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающих требуемую точность установки и поддержания режима, способы крепления РЭА на стендах и установки в камерах.

Основным в методике испытаний на любой вид воздействия является пооперационное представление процесса проведения испытаний.

Методика испытаний определяет форму учетной и отчетной документации:

- учета наработки изделия в процессе испытаний;
- учета отказов;
- протокола испытаний;
- отчета, включая анализ данных;
- выводов и рекомендаций.

При выборе испытательного оборудования и контрольно-измерительной аппаратуры необходимо учитывать общие требования, которые способствуют оперативному проведению испытаний в соответствии с ТУ, ПИ и методикой:

- наличие автоматической записи результатов;
- наличие программного управления оборудованием;
- допустимый уровень электрических, магнитных и шумовых помех.

## **2. Испытание на работоспособность изделий при статическом воздействии пыли**

Испытание проводят с целью выявления способности изделий сохранять свои параметры в среде с повышенным содержанием пыли. Испытанию подвергаются изделия, не имеющие пыленепроницаемых оболочек или не предназначенные для установки в аппаратуре с пыленепроницаемыми оболочками. Для таких изделий необходимость данного вида испытаний указывается в техническом задании, стандартах на изделия или программе испытаний.

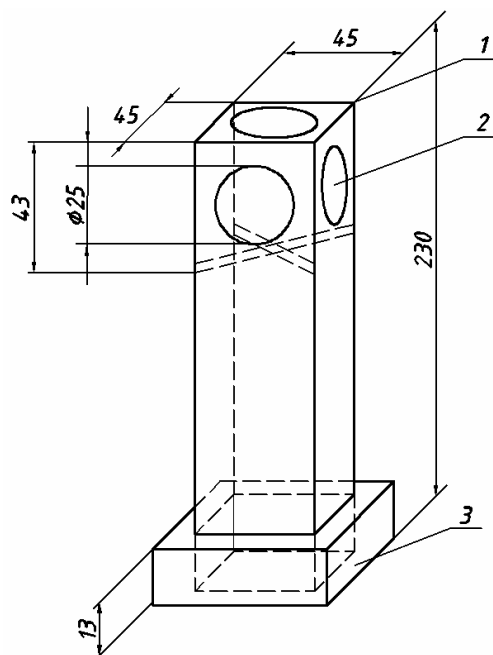
Изделия помещают в камеру пыли и располагают таким образом, чтобы воздействие пыли было наиболее эффективным и соответствовало возможному воздействию пыли в условиях эксплуатации. Способ установки изделий указывается в стандартах или программе испытаний.

Изделия подвергают воздействию пылевой смеси, находящейся во взвешенном состоянии в воздухе камеры, в течение 4-х часов. Затем в течение 2-х часов происходит оседание пыли без циркуляции воздуха в камере. Температура воздуха в камере должна быть  $55 \pm 2$  °С при относительной влажности не более 50 %.

Пылевая смесь должна состоять в основном из кварцевого песка. Скорость циркуляции воздуха в камере до оседания пыли должна быть от 0,5 до 1 м/с. Изделия могут во время испытания находиться в действии.



Концентрацию пыли при испытаниях устанавливают с помощью прибора, который представляет собой полый параллелепипед, изготовленный из листов органического стекла толщиной 2 – 4 мм (см. рисунок). Его устанавливают в любом участке камеры, в которой испытывают изделие. Пыль проникает через 5 круглых отверстий и собирается в приборе. Воздух циркулирует в камере в течение 5 мин, а затем должно происходить оседание пыли в течение 2-х часов. Количество пыли, собранной в приборе за этот период, взвешивают, при этом вес ее должен составлять  $25 + (-) 5$  г. После окончания испытания изделия извлекаются из камеры и подвергаются проверке, указанной в техническом задании.



Прибор для измерения концентрации пыли:

- 1 – направляющие перегородки;
- 2 – стойка с входными отверстиями;
- 3 – съемное дно

### 3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с программой испытаний изделий при статическом воздействии пыли.
2. Провести испытания согласно методике, указанной в задании.
3. Оформить документацию по результатам испытаний.
4. Сдать коллоквиум по данной теме.

### 4. Контрольные вопросы

1. Какой комплекс мероприятий предусматривают организация и проведение испытаний?
2. Перечислите исходные данные для организации испытаний.
3. Документационное обеспечение испытаний.
4. Основные этапы программы испытаний.
5. Методологическое обеспечение испытаний.
6. Какими принципами руководствуются при выборе испытательного оборудования?
7. Испытание на воздействие пыли. Цель. Оборудование.
8. Методика испытаний на воздействие пыли.
9. Определение концентрации пыли. Оборудование.

## Литература

1. Глудкин, О.П. Методы и устройства испытания РЭС и ЭВС / О.П. Глудкин. – М.: Высш. шк., 1991.
2. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под ред. А.И. Коробова. – М.: Радио и связь, 1987.
3. Глудкин, О.П. Технология испытаний микроэлементов радиоэлектронной аппаратуры интегральных микросхем / О.П. Глудкин, В.Н. Черняев. – М.: Энергия, 1980.
4. Млицкий, В.Д. Испытание аппаратуры и средств измерений на воздействие внешних факторов / В.Д. Млицкий, В.Х. Беглария, Л.Г. Дубицкий. – М.: Машиностроение, 1993.
5. ГОСТ 20.57.406-81 Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1991.

## Лабораторная работа № 3

### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ РЭА

**Цель работы:** 1) научить будущего специалиста расчетам допусков радиоэлектронной аппаратуры, 2) научить определять по заданным допускам возможный разброс параметров устройства РЭА; 3) научить находить по заданным допускам на параметры устройства РЭА допуски на параметры элементов.

#### 1. Уравнения погрешностей

Задача сводится к тому, чтобы при выбранных допусках на элементы аппарата погрешности его выходных параметров не превышали заданных значений.

Каждый параметр функционального узла представляет собой функцию параметров элементов, входящих в узел,

$$N = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (1)$$

где  $N$  – заданный параметр ФУ;  $q_1, q_2, \dots, q_n$  – параметры элементов, входящих в ФУ.

Уравнение относительной погрешности для заданного параметра ФУ после преобразования (1) имеет вид

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n A_i \frac{\Delta q_i}{q_i}, \quad (2)$$

где  $n$  – число параметров элементов, погрешности которых определяют точность искомого параметра ФУ;  $A_i$  – коэффициент влияния погрешности элемента, равный

$$A_i = \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)},$$

где  $\frac{\Delta q_i}{q_i}$  – относительная погрешность элемента.

Уравнение (1.2) получено с методической погрешностью, равной второму члену разложения в ряд Тейлора.

Если точность работы ФУ определяется несколькими параметрами, то составляется система уравнений погрешностей, число уравнений в которой равно числу определяющих параметров ФУ (обычно не более двух – трех).

После вывода уравнений погрешностей в общем виде находят численные значения коэффициентов влияния. В зависимости от параметров узла коэффициенты  $A_i$  могут быть функциями частоты или времени. Для упрощения расчетов обычно пользуются методом точечной оценки, определяя численные значения коэффициентов влияния подстановкой в аналитические выражения номинальных значений параметров элементов и фиксированных значений частоты или времени. Существует также целый ряд экспериментальных методов определения коэффициентов влияния [6, 8, 10, 12]. В тех случаях, когда коэффициенты влияния определяются из аналитических выражений, необходима экспериментальная проверка на сходимость для оценки величины методической погрешности, допускаемой при расчете из-за неточного аналитического описания физического процесса работы ФУ в окрестностях рабочей точки.

По численным значениям  $A_i$  оценивается влияние погрешностей параметров элементов на погрешности заданных параметров ФУ. Погрешностями, не оказывающими существенного влияния на точность работы ФУ, пренебрегают.

Затем выбираются или уточняются типы элементов ФУ.

## 2. Расчет температурных допусков

Расчет температурных допусков сводится к определению температурного коэффициента (ТК) искомого параметра как функции ТК элементов, входящих в ФУ, и определению максимально возможной погрешности (температурного допуска) при заданном в ТУ диапазоне температур.

Сочетание ряда случайных факторов при изготовлении элементов приводит к рассеянию величины их ТК. На рис. 1 приведены гистограммы распределений ТК резисторов, транзисторов и конденсаторов, подтверждающие, что ТК элементов – случайные величины, а их распределение соответствует нормальному закону.

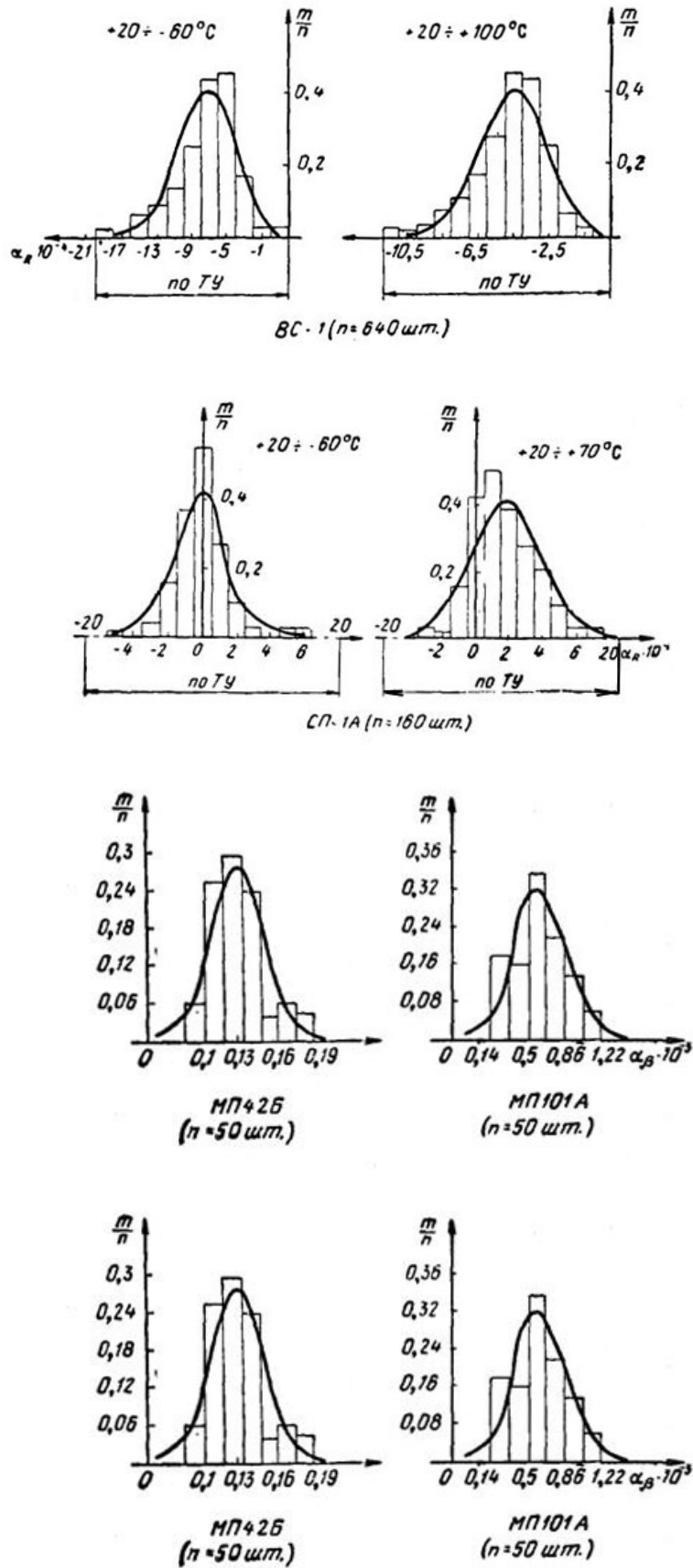


Рис. 1. Гистограммы распределений ТК сопротивлений  $\alpha_R$  резисторов, коэффициентов усиления  $\alpha_\beta$  транзисторов и емкости  $\alpha_C$  конденсаторов

Поэтому расчет ТК параметров ФУ можно вести из предположения, что распределение ТК элементов подчинено нормальному закону, расположенному симметрично относительно середины заданного поля допуска. Меньшее рассеяние ТК по сравнению с полем, заданным ТУ, повышает вероятность того, что реальная величина ТК параметра будет находиться в расчетных пределах.

При линейных и циклических изменениях параметров схемных элементов под воздействием температуры относительная погрешность элемента равна

$$\frac{\Delta q_i}{q_i} = \alpha_{q_i} \Delta t, \quad (3)$$

где  $\alpha_{q_i}$  – ТК параметра  $q_i$ ;  $\Delta t = t - 20^\circ$  – разность между конечной температурой и нормальной ( $20^\circ\text{C}$ ).

Уравнение погрешности узла (2), вызванной воздействием температуры, примет вид

$$\left[ \frac{\Delta N}{N} \right]_T = \Delta t \sum_{i=1}^n A_i \alpha_{q_i}, \quad (4)$$

где сумма представляет собой ТК параметра узла.

Из уравнения (4) получаем формулы для численных характеристик ТК:

а) среднее значение ТК

$$M(\alpha_\Sigma) = \sum_{i=1}^n A_i M \alpha_{q_i}; \quad (5)$$

б) половина поля допуска

$$\delta(\alpha_\Sigma) = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \delta^2(\alpha_{q_i})}, \quad (6)$$

где  $\alpha_\Sigma$  – ТК параметра узла;  $M \alpha_{q_i}$  – среднее значение ТК  $i$ -того элемента;

$\delta(\alpha_{q_i})$  – половина поля допуска  $i$ -того элемента, равная трем среднеквадратическим погрешностям ( $\sigma_i$ ) ТК.

При значениях  $\delta_i = 3\sigma_i$  в пределах поля допуска содержится 99,73 % всех отклонений ТК и 0,27 % выходит за них, т.е. гарантируется надежность (вероятность) соответствия поля рассеивания ТК расчетному значению, равная 0,9973.

Если приходится рассчитывать допуски с надежностью, отличающейся от указанной, то в формулу (6) вводится коэффициент гарантированной надежности обеспечения допусков  $\gamma = \delta / 3\sigma$ :

$$\delta(\alpha_{\Sigma}) = \gamma \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \delta^2(\alpha_{q_i})}. \quad (7)$$

Количественные значения  $\gamma$  для  $P_z$  от 0,65 до 0,99999 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения  $\gamma$

$P_z$	0,65	0,70	0,75	0,8	0,85	0,90	0,95	0,96
$\gamma$	0,313	0,347	0,383	0,427	0,480	0,550	0,653	0,683
$P_z$	0,97	0,98	0,99	0,9973	0,999	0,9995	0,9999	0,99999
$\gamma$	0,723	0,777	0,860	1,0	1,1	1,167	1,3	1,47

Формула (7) получена из предположения, что погрешности параметров элементов случайны и взаимонезависимы. Однако погрешности большинства параметров интегральных микросхем, транзисторов, некоторых параметров электронных ламп, параметров схем с регулировочными элементами и т.п. связаны между собой.

Расчетная формула для случая функциональной и нормальной прямолинейной корреляционной связи имеет вид

$$\delta(\alpha_{\Sigma}) = \gamma \sqrt{\sum_i A_i^2 \delta^2(\alpha_{q_i}) + \sum_{i+1} A_j \delta(\alpha_{q_i}) A_{j+1} \delta(\alpha_{q_{j+1}})}, \quad (8)$$

где  $A_i, A_j, A_{j+1}$  – коэффициенты влияния;  $\delta(\alpha_{q_i}), \delta(\alpha_{q_j}), \delta(\alpha_{q_{j+1}})$  – половины поля допуска ТК параметров  $q_i$  и  $q_j$ ;  $q_{j+1}$  – коэффициент корреляции, характеризующей степень связи между погрешностями ТК параметров  $q_j$  и  $q_{j+1}$ .

В формуле (8) по  $i$  суммируются все независимые корреляционно и функционально зависимые погрешности, а по  $j, j + 1$  суммируются пары погрешностей, связанных корреляционной и функциональной зависимостями, определяемыми коэффициентом корреляции  $r_{j, j+1}$ .

В зависимости от степени корреляционной связи коэффициенты  $r_{j, j+1}$  берутся в пределах от  $-1$  до  $+1$ . При положительном  $r_{j, j+1}$  с увеличением  $q_j$  растет и  $q_{j+1}$ , а при отрицательном  $r_{j, j+1}$  падает с ростом  $q_j$ . Крайние пределы  $r_{j, j+1}$  соответствуют линейной функциональной зависимости между погрешностями.

Значения  $r_{j, j+1}$  определяются для каждого отдельного случая расчетным или статистическим путем [6, 12].

Среди источников возникновения погрешностей температура действует как доминирующий фактор, деформируя закон нормального распределения, смещая и изменяя поле температурных погрешностей (рис. 2). Однако при расчете допусков нужно определить пределы изменения параметров РЭА под воздействием температуры, а не закон распределения плотности вероятности температурных погрешностей. Для такого расчета достаточно знать лишь количественные характеристики нормальных распределений при крайних температурах, так как при максимальном перепаде температур в заданном диапазоне они будут максимальными. Это позволяет для простоты аппроксимировать реальный закон распределения температурных погрешностей выходного параметра узла композицией закона равной вероятности и двух законов нормального распределения с различными среднеквадратическими погрешностями.

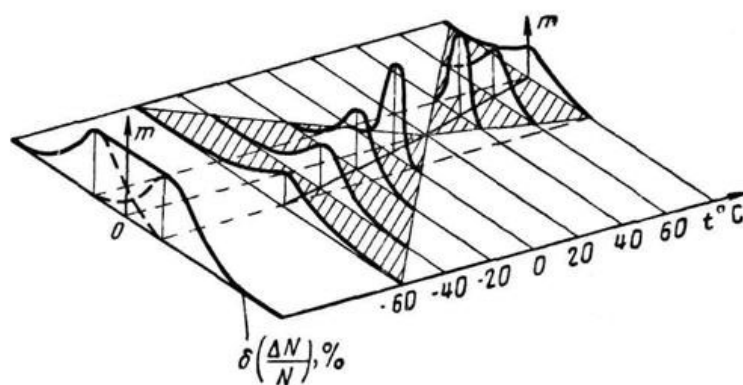


Рис. 2. Результирующий закон распределения температурных погрешностей выходного параметра ФУ

Таким образом, расчет предельных значений температурных погрешностей  $\Delta t$  параметра ФУ ведется для крайних (плюсовой и минусовой) температур рабочего диапазона,

$$\Delta t_{\pm} = M \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_T \pm \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_T = \left[ M(\alpha_{\Sigma}) \pm \delta(\alpha_{\Sigma}) \right] \Delta t.$$

Индекс  $\pm$  в обозначении  $\Delta t$  указывает на знак температуры.

По предельным значениям  $\Delta t$  определяются максимально возможные отклонения и назначается величина температурного допуска:

$$\Delta_T = \left[ M \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{T_+} + \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{T_+} \right] - \left[ M \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{T_-} - \delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{T_-} \right].$$

В основе предлагаемого метода расчета температурных допусков лежит предположение о линейном изменении параметров схемных элементов в зависимости от температуры (рис. 3, кривая 1), но он может быть распространен и на случаи, когда эти изменения имеют нелинейный характер (см. рис. 3, кривые 2, 3) и указывается лишь максимальная величина относительного изменения параметра при крайних значениях рабочего диапазона температур.

В случае, который соответствует кривой 2 на рис. 3, линейная аппроксимация приводит к завышению величины температурного допуска, что увеличивает надежность обеспечения температурных допусков. Расчет начинают с определения ТК по формуле

$$\alpha_{q_i} = \frac{\left[ \frac{\Delta q_i}{q_i} \right]_{\max}}{\Delta t_{\text{дем}}},$$

где  $\left[ \frac{\Delta q_i}{q_i} \right]$  – максимальное относительное изменение параметра схемного элемента в зависимости от температуры, заданное ТУ;  $\Delta t_{\text{дем}}$  – максимальный перепад температур относительно нормальной в заданном для элемента температурном диапазоне.

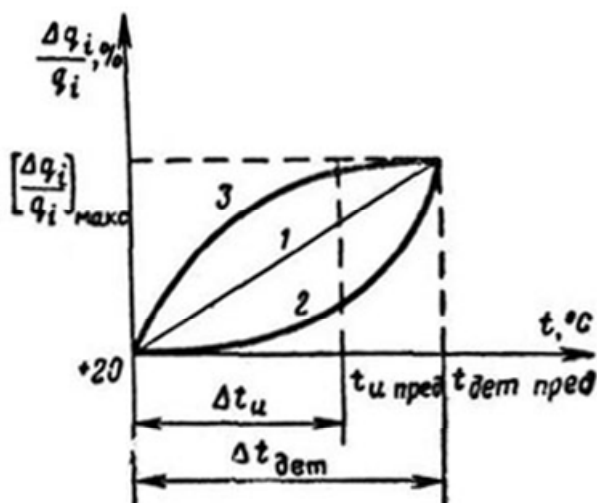


Рис. 3. Температурные изменения параметров



Далее расчет продолжают в обычном порядке.

В третьем случае (кривая 3 на рис. 3) линейная аппроксимация ведет к занижению величины температурных допусков и уменьшению надежности их обеспечения.

Чтобы избежать этого, ТК следует определять по формуле

$$\alpha_{q_i} = \frac{\left[ \frac{\Delta q_i}{q_i} \right]_{\max}}{\Delta t_u},$$

где  $\Delta t_u$  – максимальный перепад температур относительно нормальной для ФУ.

При правильном выборе элементов  $\Delta t_{dem} \geq \Delta t_u$ .

При расчете ТК для  $\Delta t_u$  величина  $\left[ \frac{\Delta q_i}{q_i} \right]$ , заданная ТУ на элементы, сохраняется в другом температурном интервале. Это позволяет считать, что требуемая надежность соответствия температурных допусков расчетным значениям обеспечивается.

### 3. Расчет допусков на старение

При линейной аппроксимации характеристик старения элементов их относительная погрешность равна

$$\frac{\Delta q_i}{q_i} = C_{q_i} \Delta \tau, \quad (9)$$

где  $C_{q_i}$  – коэффициент старения (КС)  $i$ -того элемента;  $\Delta \tau$  – интервал времени.

В качестве интервала времени может быть выбран полный срок службы аппарата либо время между регламентными работами.

С учетом выражения (9) уравнение погрешности ФУ, вызванной старением, примет вид

$$\left[ \frac{\Delta N}{N} \right]_{cm} = \Delta \tau \sum_{i=1}^n A_i C_{q_i}.$$

Здесь сумма произведений КС элементов узла на их коэффициенты влияния представляет собой КС параметра узла.

Коэффициенты старения элементов, а, следовательно, и ФУ – величины случайные (рис. 4). Экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что в качестве закона распределения КС элементов также можно принять нормальный закон.

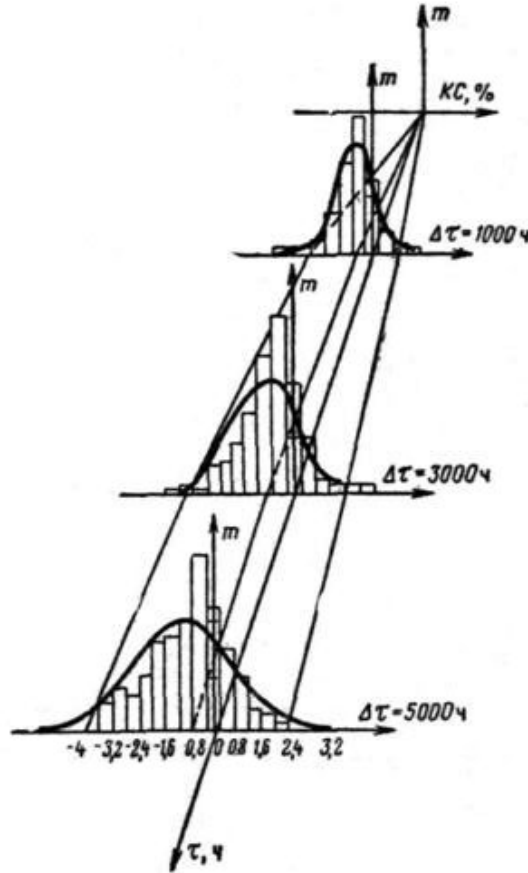


Рис. 4. Зона рассеяния КС сопротивлений резисторов, гистограммы и кривые нормального распределения (резисторы типа ВС сопротивлением несколько МОм, 1200 шт.,  $t = 40^\circ\text{C}$ , номинальная нагрузка)

По аналогии с формулами для ТК имеем формулы численных характеристик КС параметров ФУ:

а) среднее значение

$$M(C_{\Sigma}) = \sum_{i=1}^n A_i M(C_{q_i}); \quad (10)$$

б) половина поля допуска

$$\delta(C_{\Sigma}) = \gamma \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \delta^2(C_{q_i})}, \quad (11)$$

где  $M(C_{q_i})$  – среднее значение КС  $i$ -того элемента;  $\delta(C_{q_i})$  – половина поля допуска КС  $i$ -того элемента.

При наличии корреляционно связанных погрешностей

$$\delta(C_{\Sigma}) = \gamma \frac{1}{\sqrt{\sum_i A_i^2 \delta^2 C_{q_i} + \sum_{j,j+1} 2r_{j,j+1} A_j \delta C_{q_i} A_{i+1} \delta(C_{q_{i+1}})}}, \quad (12)$$

где  $r_{j,j+1}$  – коэффициент корреляции между погрешностями КС параметров  $q_j$  и  $q_{j+1}$ .

Далее определяется допуск на старение

$$\Delta_{cm} = M\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{cm} \pm \delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{cm} = [M(C_{\Sigma}) \pm \delta(C_{\Sigma})] \Delta \tau.$$

Если в ТУ даются не КС элементов, а максимальные величины относительных изменений их параметров за срок службы, то при определении КС следует поступать так же, как и при определении ТК.

#### 4. Расчет допусков на влажность

Разброс параметров ФУ под воздействием влаги обусловлен в основном изменением от влажности сопротивлений напроволочных резисторов. Это изменение составляет 15 – 25 % от общей нестабильности параметров ФУ, так как 30 – 50 % радиоэлементов составляют непроволочные резисторы.

Расчет допусков на влажность сводится к определению коэффициента увлажнения (КУ) параметра узла по КУ непроволочных резисторов, предельные значения которых можно рассматривать как пределы относительного изменения сопротивлений резисторов под воздействием влаги.

Коэффициенты увлажнения непроволочных резисторов являются случайными величинами, распределение которых соответствует нормальному закону (рис. 5).

Уравнение погрешности, вызванной влагой, имеет вид

$$\left[\frac{\Delta N}{N}\right]_{вл} = \sum_{i=1}^n A_i \left[\frac{\Delta q_i}{q_i}\right]_{вл}. \quad (13)$$

Принимая закон распределения КУ нормальным и симметричным, получаем формулы численных характеристик КУ ФУ:

а) среднее значение

$$M(h_{\Sigma}) = \sum_{i=1}^n A_i M(h_i); \quad (14)$$

б) половина поля допуска

$$\delta(h_{\Sigma}) = \gamma \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \delta^2(h_i) + \sum_{j,j+1} 2r_{j,j+1} A_j \delta(h_j) A_{j+1} \delta(h_{j+1})}}, \quad (15)$$

где  $M(h_{\Sigma})$  – КУ параметра узла;  $M(h_i)$ ,  $\delta(h_i)$  – среднее значение и половина поля допуска КУ  $i$ -того элемента;  $\gamma$  – коэффициент гарантированной надежности.

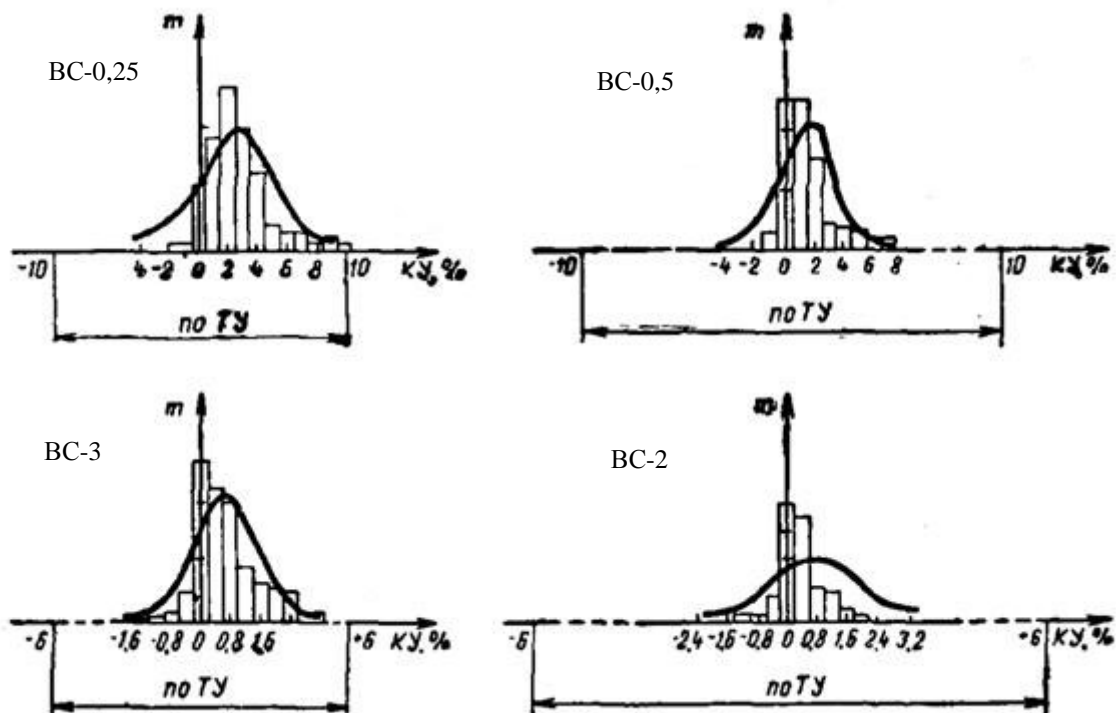


Рис. 5. Гистограммы и кривые нормального распределения КУ сопротивлений резисторов (сопротивление – единицы МОм, 240 шт., нормальная мощность рассеяния)

Пределы поля рассеивания КУ параметра ФУ будут допусками на влажность для этого параметра

$$\Delta_{вл} = M(h_{\Sigma}) \pm \delta(h_{\Sigma}). \quad (16)$$

При выбранных типах резисторов допуски на влажность определяются однозначно.

Таким же образом можно производить расчет допусков на выходные параметру ФУ и во всех других случаях, если известны пределы изменения и законы распределения параметров элементов.

## 5. Определение производственных допусков

После расчета допусков, учитывающих воздействие влажности, старения и температуры, следует рассчитать, какая часть эксплуатационного допуска осталась на производственный разброс.

Известно, что эксплуатационные допуски, заданные ТУ, характеризуют точность работы устройства в период эксплуатации и ограничивают отклонения параметров узлов, вызванные суммой поддающихся расчету погрешностей (производственных, температурных, старения, влаги) и погрешностей, вызванных изменениями атмосферного давления, солнечной радиацией, пылью и другими факторами, которые рассчитать нельзя. Нестабильность характеристик радиоэлементов, вызванная группой погрешностей, не поддающихся расчету, не превышает 5 – 10 % от общей нестабильности. На этом основании по заданному эксплуатационному допуску  $\Delta_{\Sigma}$  определяют его расчетную величину

$$\Delta_{\Sigma \text{ расч}} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\xi},$$

где  $\xi = 1,05 - 1,2$  – коэффициент запаса.

Во время эксплуатации радиоизделий под воздействием непрерывно меняющихся комбинаций дестабилизирующих факторов происходит смещение и изменение суммарного поля рассеивания производственных, температурных погрешностей, погрешностей старения и влаги (рис. 6).

В этом случае суммарный закон распределения погрешностей выходных параметров радиоизделий случаен и в зависимости от погодных условий может принимать любую форму (кривая *a* на рис. 6). Однако для расчета эксплуатационных допусков важно знать лишь возможные пределы изменения выходных параметров радиоизделий  $\Delta_{\Sigma}$ . Поэтому результирующее распределение можно аппроксимировать законом, представляющим собой композицию закона равной вероятности и нормального закона (кривая *b* на рис. 6).

Расчет ведется в следующем порядке. Вначале определяют максимальные пределы смещения среднего значения суммарного поля рассеивания путем отдельного суммирования положительных и отрицательных средних значений температурных допусков, допусков на старение и влажность. Суммирование ведется относительно среднего значения производственного допуска, так как относительно его происходит смещение среднего при воздействии любых комбинаций дестабилизирующих факторов.

Расчет выполняется по формуле

$$M\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\Sigma\pm} = M\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{np} + \sum_{i=1}^n M_i\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\pm}. \quad (17)$$

Общее суммирование с компенсацией средних значений здесь недопустимо, так как компенсация характерна лишь для частного случая совместного действия тех факторов, при которых она оказалась возможной. Иначе это может привести к неверному выводу о величине суммарного поля рассеивания.

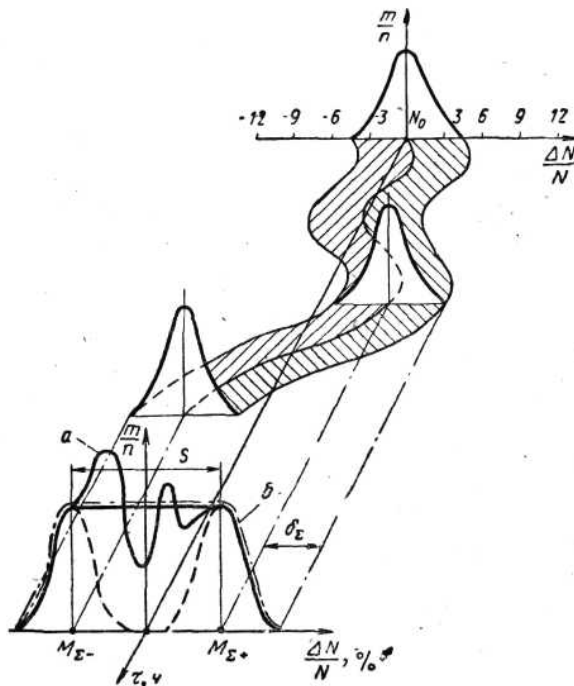


Рис. 6. Суммарный закон распределения погрешностей параметров ФУ

Далее определяется половина поля рассеивания путем вычитания из половины расчетной величины эксплуатационного допуска модуля наибольшей суммы средних значений

$$M\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\Sigma\pm} = M\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{np} + \sum_{i=1}^n M_i\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\pm}. \quad (18)$$

где  $\sum_{i=1}^3 \delta_i^2 \left(\frac{\Delta N}{N}\right)$  – квадратичное суммирование половин полей допусков на старение, влажность и температуру.

Затем определяется половина производственного допуска на параметр.

При крайних температурах рабочего диапазона поля рассеивания температурных погрешностей различны, но эти различия обычно невелики. Поэтому можно определять половину поля производственного допуска при наибольшей величине температурного допуска.

## 6. Расчет допусков на параметры элементов

Производственный разброс параметров схемных элементов в пределах поля допуска носит случайный характер [6, 9, 12]. Поэтому для расчета допусков нужно знать законы распределения параметров элементов или хотя бы количественные значения коэффициентов  $ai$  и  $ki$ , по которым уже можно рассчитывать допуски с высокой точностью.

Статистический материал, накопленный и опубликованный в последние годы, позволяет считать, что:

1. Распределение параметров ламп подчинено нормальному закону:  $ai = 0, ki = 1$  [6, 13].

2. Распределения большинства параметров транзисторов не соответствуют нормальному закону, а относительные коэффициенты распределений  $ai$  и  $ki$  отдельных партий имеют значительный разброс [12].

В табл. 2 приведены предельные значения коэффициента  $ai$  некоторых параметров транзисторов (статистическая совокупность 2500 шт.) при включении их по схеме с общей базой (ОБ).

Таблица 2

Предельные значения

Параметры	Коэффициент $\gamma$				
	0,85	0,9	0,95	0,99	0,997
$\alpha$ . . . . .	$+0,85 \div$ $\div -0,85$	$+0,85 \div$ $\div -0,85$	$+0,85 \div$ $\div -0,85$	$+0,85 \div$ $\div -0,85$	$+0,85 \div$ $\div -0,85$
$I_{к0}$ и $I_{обр}$ . . . . .	$0 \div -0,85$	$0 \div -0,85$	$0 \div -0,85$	$+0,85 \div$ $\div -0,85$	$+0,85 \div$ $\div -0,85$
$h_{12}$ и $h_{22}$ . . . . .	$-0,85 \div$ $\div +0,31$	$-0,85 \div$ $\div +0,33$	$-0,85 \div$ $\div +0,39$	$-0,85 \div$ $\div +0,48$	$-0,85 \div$ $\div +0,58$
$C_K$ и $r_б C_K$ . . . . .	$-0,85 \div$ $+0,1$	$-0,85 \div$ $\div +0,13$	$-0,85 \div$ $\div +0,15$	$-0,85 \div$ $\div +0,20$	$-0,85 \div$ $\div +0,25$

Из таблицы видно, что  $ai$  отдельных партий транзисторов имеют значительный разброс. Поэтому при расчете средних значений нужно брать предельные значения  $ai$  с требуемой надежностью, ориентируясь на худший случай. Расчет средних значений при включении транзистора с общим

эмиттером (ОЭ) или общим коллектором (ОК) ведется с учетом следующих равенств:

$$\begin{aligned}
 a(h_{22OK}) &= a(h_{22OЭ}) = a(h_{22OB}); \\
 a(h_{12OB}) &= a(h_{12OЭ}) = a(h_{12OK}) = 0; \\
 a_{\beta}(P_2 = 0,997) &= -0,85; \\
 a_{\beta} &= a(h_{11OЭ}); a_{\alpha} = a(h_{11OB}).
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

По указанной статистической совокупности с надежностью 0,9973 рассчитаны предельные значения относительного коэффициента рассеивания  $k_i$  некоторых параметров транзисторов, включенных по схеме с общей базой (табл. 3).

Таблица 3

Предельные значения  $k_i$

Параметры транзистора	$\alpha$	$I_{KO}, I_{OБP}$	$h_{22}$	$h_{12}$	$C_K$	$r_6 C_K$
$k_i$ . . . . .	2,27	1,74	2,2	2,2	0,91	2,16

Этими значениями  $k_i$  следует пользоваться при расчете относительной стандартной погрешности ФУ на транзисторах.

При включении транзистора с ОЭ или ОК пересчет  $k_i$  производится по формулам

$$\begin{aligned}
 k(h_{22OK}) &= k(h_{22OЭ}) = k(h_{22OB}); \\
 k(h_{12OB}) &= k(h_{12OЭ}) = k(h_{12OK}) = 0.
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Если в паспортных данных указаны допуски по  $\alpha$ , то по табличному  $k_{\alpha}$  определяется

$$k_{\beta} = k_{\alpha} \frac{(1 - \alpha_{\max})(1 - \alpha_{\min})}{(1 - \alpha_0)^2},
 \tag{21}$$

где  $\alpha_0 \approx \frac{\alpha_{\max} + \alpha_{\min}}{2}$ .

Если даны допуски по  $\beta$ , тогда определяются

$$\alpha_{\max} = \frac{\beta_{\max}}{1 + \beta_{\max}}; \quad \alpha_{\min} = \frac{\beta_{\min}}{1 + \beta_{\min}},
 \tag{22}$$

а затем по формуле (22) определяется  $\beta$ .



При расчете относительной стандартной погрешности параметров ФУ с надежностью, отличной от 0,9973, вводят коэффициент гарантированной надежности  $\gamma$ .

3. Распределения параметров резисторов и конденсаторов данного типа наиболее высоких классов точности подчинены нормальному закону

$$k(h_{110Э}) = k_{\beta}.$$

4. Распределения параметров резисторов и конденсаторов низших классов точности обычно отличаются от нормального закона из-за выборки резисторов и конденсаторов повышенных классов точности из общих партий с более широкими допусками. Поэтому для деталей второго класса точности принимают  $k_i = 1,33$ , а для деталей третьего класса точности  $k_i = 2,1$ .

Уравнение производственной погрешности заданного параметра ФУ

$$\left[ \frac{\Delta N}{N} \right]_{np} = \sum A_i \left[ \frac{\Delta q_i}{q_i} \right]_{np}. \quad (23)$$

Численные характеристики производственной погрешности параметров ФУ:

а) среднее значение

$$M \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{np} = \sum_{i=1}^n A_i \left[ \Delta \left( \frac{\Delta q_i}{q_i} \right) + a_i \delta \left( \frac{\Delta q_i}{q_i} \right) \right]; \quad (24)$$

б) половина поля допуска

$$\delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{np} = \gamma \frac{1}{\sqrt{\sum_i A_i^2 k_i^2 \delta^2 \left( \frac{\Delta q_i}{q_i} \right) + \sum_{j, j+1} 2r_{j, j+1} A_j k_j \delta \left( \frac{\Delta q_j}{q_j} \right) A_{j+1} k_{j+1} \delta \left( \frac{\Delta q_{j+1}}{q_{j+1}} \right)}}, \quad (25)$$

где  $\Delta \left( \frac{\Delta q_i}{q_i} \right)$  – середина поля допуска на  $q_i$ ;  $a_i$  – коэффициент относительной асимметрии;  $k_i, k_j, k_{j+1}$  – коэффициенты относительного рассеивания распределений параметров  $q_i, q_j$  и  $q_{j+1}$ ;  $r_{j, j+1}$  – коэффициент корреляции между параметрами  $q_j$  и  $q_{j+1}$ .

Вначале по уравнению (24) проводится анализ степени влияния погрешностей схемных элементов на погрешность заданного параметра узла и по допуску на него выбираются допуски на схемные элементы. Затем по

формуле (25) определяется середина поля производственного допуска  $M[\Delta N/N]$  заданного параметра узла.

Допуски на параметры подавляющей части схемных элементов симметричны, поэтому  $\Delta(\Delta q_i/q_i) = 0$  и  $a_i = 0$ .

$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{пр.расч} \geq \delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{пр}. \quad (26)$$

В тех случаях, когда  $M[\Delta N/N]$  не равно 0, по формуле (24) находятся пределы смещения среднего значения  $M[\Delta N/N]\Sigma$ , по формулам (25) и (26) последовательно рассчитываются  $\delta[\Delta N/N]\Sigma$  и  $\delta[\Delta N/N]_{пр}$ .

После этого определяется половина поля производственного допуска при выбранных допусках на элементы. Расчет ведется методом последовательных приближений. Если половина поля производственного допуска  $\delta[\Delta N/N]_{пр}$ , рассчитанная по формуле (25), оказалась больше расчетной  $\delta[\Delta N/N]_{пр.расч}$ , определенной по формуле (26), то допуски на элементы выбраны неудачно и расчет повторяется до тех пор, пока не выполнится условие (26).

## 7. Пример расчета

На элементы усилителя низкой частоты (УНЧ), конструкция и принципиальная схема которого показаны на рис. 7, требуется выбрать допуски, при которых с надежностью  $P_p = 0,99$  ( $y = 0,86$ ) и коэффициентом запаса 1,1 в течение 1000 ч работы с колебаниями температуры окружающей среды от  $-60$  до  $+60$  °С и изменением относительной влажности до 98 % обеспечивался бы эксплуатационный допуск на коэффициент усиления по напряжению на средней частоте  $K$ , равный  $\pm 25$  %.

Усилитель низкой частоты собран на транзисторе МП16А; в состав схемы входят резисторы МЛТ-0,25 ( $R_1 = 10$ ,  $R_2 = 1,8$  и  $R_3 = 43$  кОм,  $R_4 = R_5 = 130$  Ом), конденсатор С1 типа МБМ емкостью 0,5 мкФ.

Режим работы усилителя:  $U_{вх} = 10$  мВ;  $E_k = -10$  В  $\pm 5$  %.

Параметры транзистора в рабочей точке:  $h_{11} = 1,4$  кОм,  $\beta = 40$ ; нагрузочное сопротивление усилителя  $R_n = 1$  кОм  $\pm 20$  %; ТК сопротивления в области положительных температур  $ar = (0,6 \pm 0,2)$  % на 1 °С, а в области отрицательных –  $ar_n = (0,3 \pm 0,15)$  % на 1 °С, коэффициенты старения и увлажнения  $C_{rн} = h_{rн} = 0$ .

Выражение для коэффициента усиления по напряжению такого усилителя имеет вид

$$K = -\frac{\beta R_2 R_3 R_H (R_4 + R_5)}{R_3 (R_2 + R_H) [(R_C + h_{11})(R_4 + R_5) + \beta R_4 R_5] + \beta R_C R_2 R_H (R_4 + R_5)}, \quad (27)$$

где  $R_C$  – емкостное сопротивление конденсатора  $C_1$ .

Сопротивление резистора  $R_1$  в выражение для  $K$  не входит. Следовательно, влияние его разброса на коэффициент усиления незначительно и допуск на него можно взять  $\pm 20\%$ .

1. По уравнению (23) составляем исходное уравнение погрешностей и определяем численные значения коэффициентов влияния путем подстановки в аналитические выражения для них номинальных значений параметров элементов. Влияние нестабильности напряжения питания на коэффициент усиления определяем экспериментально. Коэффициент влияния оказывается равным 0,9. В результате уравнение погрешностей примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\Delta K}{K} = & +0,35 \frac{\Delta \beta}{\beta} - 0,28 \frac{\Delta h_{11}}{h_{11}} + 0,58 \frac{\Delta R_2}{R_2} + 0,2 \frac{\Delta R_3}{R_3} - 0,23 \frac{\Delta R_4}{R_4} - \\ & - 0,23 \frac{\Delta R_5}{R_5} - 0,23 \frac{\Delta R_5}{R_5} + 0,21 \frac{\Delta R_H}{R_H} - 0,36 \frac{\Delta C_1}{C_1} + 0,9 \frac{\Delta E_K}{E_K}. \end{aligned}$$

2. Пользуясь полученным уравнением, произведем расчет температурных допусков. Согласно справочным данным ТК сопротивлений резисторов типа МЛТ в диапазоне температур от  $+20$  до  $-60$  °С  $a_r = \pm 12 \cdot 0,01\%$  на  $1$  °С, а в интервале от  $20$  до  $80$  °С  $a_r = \pm 7 \cdot 0,01\%$  на  $1$  °С.

Допустимые пределы изменения емкости конденсаторов типа МБМ в диапазоне температур от  $-60$  до  $+70$  °С составляют  $\pm 10\%$ .

В диапазоне температур от  $+20$  до  $+60$  °С получаем:

$$a_C = \frac{\pm 10}{40} = \pm 0,25\% \text{ на } 1 \text{ °С.}$$

По справочным данным на транзисторы повышение температуры до  $+60$  °С приводит к увеличению  $\beta$  на  $(50 \pm 20)\%$ ; в диапазоне от  $+20$  до  $-60$  °С

$$a_C = \frac{\pm 10}{80} = \pm 0,125\% \text{ на } 1 \text{ °С,}$$

$\beta$  увеличивается на  $(80 \pm 25)\%$ , следовательно,

$$a_{\beta+} = \frac{(+50 \pm 20)\%}{40} = (1,25 \pm 0,5)\% \text{ на } 1^\circ\text{C};$$

$$a_{h_{11}+} = \frac{(-80 \pm 20)\%}{-40} = (2 \pm 0,625)\% \text{ на } 1^\circ\text{C}.$$

Понижение температуры до  $-60^\circ\text{C}$  ведет к уменьшению  $\beta$  на  $(50 \pm 20)\%$ , а  $h_{11}$  – на  $(-60 \pm 30)\%$ .

Отсюда

$$a_{\beta-} = \frac{(-50 \pm 20)\%}{-80} = (0,625 \pm 0,25)\% \text{ на } 1^\circ\text{C};$$

$$a_{h_{11}-} = \frac{(-60 \pm 30)\%}{-80} = (0,75 \pm 0,375)\% \text{ на } 1^\circ\text{C}.$$

На напряжение источников питания, имеющих самостоятельное конструктивное оформление в виде узлов или блоков, обычно даются эксплуатационные допуски. Поэтому при расчете температурных допусков, допусков на влажность и старение можно принять погрешность  $\Delta E_K/E_K = 0$ .

Зная ТК параметров схемных элементов, определяем среднее значение и половину поля допуска на ТК коэффициента усиления. При этом необходимо учесть, что коэффициент корреляции между входным сопротивлением  $\beta$  и коэффициентом усиления транзистора  $h_{11} = 0,9$ .

Таким образом, в диапазоне температур от  $20$  до  $60^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} M(\alpha_K)_+ &= 0,35M(\alpha_\beta) - 0,28M(\alpha_{h_{11}}) + 0,21M(\alpha_{R_H}) = \\ &= 0,35 \cdot 1,25 - 0,28 \cdot 2 + 0,21 \cdot 0,6 = 0,004\% \text{ на } 1^\circ\text{C}; \\ \delta(\alpha_K)_+ &= \gamma \sqrt{0,35^2 \delta^2(\alpha_\beta) + 0,28^2 \delta^2(\alpha_{h_{11}}) + 0,58^2 \delta^2(\alpha_{R_2}) +} \\ &+ 0,2^2 \delta^2(\alpha_{R_2}) + 0,23^2 \delta^2(\alpha_{R_1}) + 0,23^2 \delta^2(\alpha_{R_5}) + 0,21^2 \delta^2(\alpha_{R_H}) + \\ &+ 0,36^2 \delta^2(\alpha_{C_1}) - 2r_{\beta, h_{11}} \cdot 0,35 \delta(\alpha_\beta) \cdot 0,28 \delta(\alpha_{h_{11}}) = \\ &= 0,86 \sqrt{0,35^2 \cdot 0,5^2 + 0,28^2 \cdot 0,625^2 + (0,58^2 + 0,2^2 +} \\ &+ 0,23^2 + 0,23^2) 7 \cdot 10^{-2} + 0,21^2 \cdot 0,2^2 + 0,36^2 \cdot 0,25^2 -} \\ &- 2 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \cdot 0,5 \cdot 0,28 \cdot 0,625} = 0,117\% \text{ на } 1^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

В интервале температур от +20 до -60 °С

$$M(\alpha_k) = 0,072 \% \text{ на } 1 \text{ } ^\circ\text{С};$$

$$\delta(\alpha_k) = 0,0946 \% \text{ на } 1 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Теперь найдем поле рассеивания температурных погрешностей при крайних температурах рабочего диапазона:

а) при  $t = 60 \text{ } ^\circ\text{С}$

$$\Delta_{T+} = \left[ M(\alpha_K)_+ \pm \delta(\alpha_K)_+ \right] \Delta t = [0,004 \pm 0,117](60 - 20) = (0,16 \pm 4,68) \% ;$$

б) при  $t = -60 \text{ } ^\circ\text{С}$

$$\Delta_{T-} = [0,072 \pm 0,0948](-60 - 20) = (-5,76 \pm 7,57) \% .$$

3. Произведем расчет допусков на старение. По ТУ для резисторов типа МЛТ за 2000 ч работы возможно изменение сопротивления на  $\pm 4 \%$ , следовательно, величина коэффициента старения

$$C_R = \frac{\pm 4\%}{2000} = \pm 2 \cdot 10^{-3} \% \text{ на } 1 \text{ ч}.$$

Для конденсаторов МБМ гарантийный срок службы по справочным данным равен 1000 ч, а изменение емкости за это время составляет не более  $\pm 10 \%$ , следовательно,

$$C_{C_1} = \frac{\pm 10}{1000} = \pm 10 \cdot 10^{-3} \% \text{ на } 1 \text{ ч}.$$

Параметры транзисторов при старении изменяются незначительно, поэтому считаем  $C_\beta = C_{h11} = 0$ . Величина  $R_n$  в основном определяется входным сопротивлением транзистора следующего каскада и, следовательно,  $C_{Rn} = 0$ . Как уже отмечалось, при расчете допусков на старение можно считать, что  $\Delta E_K / E_K = 0$ .

С учетом изложенного рассчитаем допуски на старение:

$$M(C_K) = 0;$$

$$\begin{aligned} \delta(C_K) &= \gamma \sqrt{(0,58^2 + 0,2^2 + 0,23^2 + 0,23^2) \delta^2(C_R) + 0,36^2 \delta^2(C_{C_1})} = \\ &= 0,86 \sqrt{(0,58^2 + 0,2^2 + 0,23^2 + 0,23^2) (2 \cdot 10^{-3})^2 + 0,36^2 (10 \cdot 10^{-3})^2} = \\ &= 3,32 \cdot 10^{-3} \% \text{ на } 1 \text{ ч}; \end{aligned}$$

$$\Delta_{cm} = \left[ M(C_K) \pm \delta(C_K) \right] \Delta \tau = \pm 3,32 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = \pm 3,32 \% .$$

4. Расчет допусков на влажность. Как уже отмечалось, под влиянием влаги параметры транзисторов и конденсаторов практически не меняются, поэтому их погрешности можно принять равными нулю. Это относится и к  $R_n$ , так как его величина в основном определяется параметрами транзистора. Следовательно, погрешности увлажнения будут определяться изменением сопротивлений резисторов МЛТ. По ТУ на резисторы МЛТ для сопротивлений до 1 МОм коэффициент увлажнения находится в пределах от  $-3$  до  $+6$  %. Полагая распределение КУ нормальным и симметричным, имеем  $h_R = (1,5 \pm 4,5)\%$ .

Рассчитаем допуски на влажность:

$$M(h_K) = (0,58 + 0,2 - 0,23 - 0,23) \cdot 1,5 = 0,48\% ;$$

$$\delta(h_K) = 0,86 \sqrt{(0,58^2 + 0,2^2 + 0,23^2 + 0,23^2)} \cdot 4,5^2 = 2,69\% ;$$

$$\Delta_{gl} = (0,48 \pm 2,69)\% .$$

5. Расчет производственных допусков. Для обеспечения заданного эксплуатационного допуска на коэффициент усиления УНЧ можно изменять только допуски на сопротивления резисторов и емкость конденсатора, поскольку допуск на напряжение питания задан, а подбор транзисторов обычно не допускается.

Согласно ТУ на транзисторы МП16А коэффициент усиления может находиться в пределах 30 – 50. Среднее значение  $\beta$  равно 40, при этом половина поля рассеивания  $P$  составляет 25 %, а координаты середины поля допуска  $\Delta \left( \frac{\Delta \beta}{\beta} \right)$ .

Коэффициенты относительной асимметрии распределения отклонений в поле допуска ( $\alpha_\beta$ ) и относительного рассеивания ( $k\beta$ ) параметра  $\beta$  сплавных германиевых транзисторов соответственно равны 0,85 и 2,02. Поскольку между параметрами  $\beta$  и  $h_{11}$  низкочастотных германиевых транзисторов имеет место тесная корреляционная связь ( $r_\beta, h_{11} = 0,9$ ), то допуск на параметр  $h_{11}$  и значения коэффициентов  $\alpha_{h_{11}}$  и  $k_{h_{11}}$  можно взять такими же, как и для параметра.

С учетом изложенного определяем величину систематической составляющей производственных погрешностей коэффициента усиления УНЧ.

В данном случае она обусловлена лишь асимметрией распределений  $\beta$  и  $h_{11}$ :

$$M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{np} = 0,35(-0,85)25 - 0,28(-0,85)25 = -1,49\% .$$

Находим пределы смещения систематической составляющей суммарного поля рассеивания коэффициента усиления УНЧ:

$$M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma+} = M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{np} + M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{T+} + M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{вл} = -1,49 + 0,16 + 0,48 = -0,85\% ;$$

$$M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma-} = M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{np} - M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{T-} = -1,49 - 5,76 = -7,25\% .$$

Находим расчетную величину эксплуатационного допуска

$$\Delta_{эп} = \frac{\Delta_{э}}{\xi} = \frac{\pm 25}{1,1} = \pm 22,6\% .$$

Определяем величину случайной составляющей суммарного поля рассеивания

$$\delta\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma} = \frac{1}{2}\Delta_{эп} - \left| M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma} \right|_{\max} = 22,6 - 7,25 = 15,35\% .$$

По найденной величине случайной составляющей суммарного поля рассеивания определяем допустимую величину случайной составляющей поля рассеивания производственных погрешностей

$$\begin{aligned} \delta\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{np.дон} &= \sqrt{\delta^2\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma} - \left[ \delta^2\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{см} + \delta^2\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{вл} + \delta^2\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{T-} \right]} = \\ &= \sqrt{15,35^2 - [3,32^2 + 2,69^2 + 7,57^2]} = 12,67\% . \end{aligned}$$

6. Расчет допусков на параметры схемных элементов. Учитывая допустимую величину случайной составляющей поля рассеивания производственных погрешностей, величины коэффициентов влияния погрешностей элементов на погрешность коэффициента усиления УНЧ, выбираем допуски на сопротивления ( $R_2 \pm 10\%$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  и  $R_5 \pm 20\%$ ) и на емкость конденсатора ( $C_1 \pm 10\%$ ).

При выбранных допусках на элементы производим расчет величины случайной составляющей производственных погрешностей коэффициента усиления УНЧ:

$$\begin{aligned}
\delta\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{np} &= \gamma \sqrt{0,35^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right) + 0,28^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta h_{11}}{h_{11}}\right) +} \\
&\frac{+0,58^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right) + 0,2^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta R_3}{R_3}\right) + 0,23^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta R_4}{R_4}\right) +}{+0,23^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta R_5}{R_5}\right) + 0,21^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta R_n}{R_n}\right) + 0,36^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right) +} \\
&\frac{+0,9^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta E_a}{E_a}\right) - 2r_{\beta, h_{11}} 0,35 \delta \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right) 0,28 \delta \left(\frac{\Delta h_{11}}{h_{11}}\right) =}{=} \\
&= 0,86 \sqrt{0,35^2 \cdot 25^2 + 0,28^2 \cdot 25^2 + 0,58^2 \cdot 10^2 + (0,2^2 + 0,23^2 +} \\
&\frac{+0,23^2 + 0,23^2) \cdot 20^2 + 0,21^2 \cdot 20^2 + 0,36^2 \cdot 10^2 + 0,9^2 \cdot 5^2 -}{-2 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \cdot 25 \cdot 0,28 \cdot 25} = 10,82 \% .
\end{aligned}$$

Полученная величина случайной составляющей поля рассеивания производственных погрешностей меньше допустимой. Условие (1.34) выполняется  $10,82\% < 12,67\%$ . Следовательно, при выбранных допусках на параметры схемных элементов эксплуатационный допуск на коэффициент усиления УНЧ в заданных условиях будет обеспечен с гарантированной надежностью  $P_\gamma = 0,99$ .

## 8. Порядок выполнения работы

1. Получить задание у преподавателя – электрическую схему устройства.
2. Определить номинальные значения параметров радиодеталей.
3. Выбрать электрический режим работы ламп, полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (МС).
4. Определить количество блоков и функциональных узлов (ФУ).
5. Указать условия эксплуатации и требуемую точность параметров.
6. По заданным допускам на параметры элементов определить возможный разброс параметров устройства.
7. По заданным допускам на параметры аппарата найти допуски на параметры элементов.

## 9. Контрольные вопросы

1. Порядок расчета температурных допусков РЭА. Температурный коэффициент.
2. Коэффициент старения. Закон распределения КС элементов.
3. Порядок расчета допусков на влажность. Коэффициент увлажнения.
4. Эксплуатационные допуски.



## ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

*Аккредитация* – процедура, посредством которой уполномоченный в соответствии с законодательными актами орган официально признает возможность выполнения лицом или органом конкретных работ в заявленной области.

*Анализ со стороны руководства* – официальная оценка высшим руководством состояния системы менеджмента качества (СМК), определение ее пригодности, адекватности и результативности, а также соответствия СМК политике в области качества и целям.

*Примечания:*

1. Анализ со стороны руководства может включать анализ и оценку пригодности политики в области качества.

2. Результаты внутренних проверок (аудитов) являются одними из возможных входных данных для анализа со стороны руководства.

3. Термин «высшее руководство» относится к руководству организации, система качества которой анализируется.

*Анализ контракта* – систематическая деятельность, предпринимаемая организацией (поставщиком) до подписания контракта на поставку продукции, чтобы убедиться, что требования к качеству точно определены, избавлены от двусмысленности, документально оформлены и могут быть выполнены поставщиком.

*Примечания:*

1. Анализ контракта является обязанностью организации, но может быть выполнен совместно с потребителем.

2. Анализ контракта может быть повторен на различных стадиях, если это необходимо.

*Анализ проекта* – документированная, всесторонняя и систематическая проверка проекта с целью оценки его возможности выполнять требования к качеству, выявлять проблемы и определять их решения.

*Примечание.* Анализ проекта может проводиться на любом этапе процесса проектирования, но в любом случае он должен быть осуществлен по завершении процесса.

*Аттестат аккредитации* – документ, выданный аккредитующим органом и регистрирующий факт официального признания компетентности организации в определенной области деятельности (либо независимости и компетентности).

*Аттестация организации* – проверка организации с целью определения ее соответствия критериям аккредитации.

*Безопасность* – отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения ущерба.

*Примечание.* В области стандартизации безопасность продукции, процессов и услуг обычно рассматривается с целью достижения оптимального баланса ряда факторов, включая такие нетехнические факторы, как поведение человека, позволяющего свести устранимый риск, связанный с возможностью нанесения ущерба здоровью людей и сохранности имущества, до приемлемого уровня.

*Внешние потребители* – это непосредственные внешние потребители продукции или услуг предприятия и все другие внешние потребители в цепочке распределения этой продукции или услуг вплоть до конечного потребителя.

*Всеобщее руководство качеством* – подход к руководству организацией, нацеленный на качество, основанный на участии всех ее членов и направлений на достижение долгосрочного успеха путем удовлетворения требований потребителя и выгоды для членов организации и общества.

*Примечания:*

1. «Все члены» означает персонал во всех подразделениях и на всех уровнях организационной структуры.

2. Сильное и настойчивое руководство со стороны высшей администрации, обучение и подготовка всех членов организации являются существенными моментами для успешной реализации приведенного подхода.

3. При всеобщем руководстве качеством концепция качества имеет отношение к достижению всех целей управления.

4. «Выгода для общества» подразумевает выполнение требований общества.

5. Total quality management (TQM) (всеобщее руководство качеством) или его составные части иногда называют «Total quality» (всеобщее качество), «CWQC» (company wide quality control) (управление качеством в масштабах компании), «TQC» (total quality control) (всеобщее управление качеством) и т.д.

*Всеобщее управление качеством (TQM)* – модель ЕФУК для ведения бизнеса основана на вышеуказанных концепциях и других соответствующих понятиях.

*Гармонизированные стандарты* – стандарты, относящиеся к одному и тому же объекту и утвержденные различными органами, занимающимися стандартизацией, которые обеспечивают взаимозаменяемость продукции, процессов и услуг и взаимное понимание результатов испытаний или информации, представляемой в соответствии с этими стандартами.

*Примечания:*

1. Гармонизированные стандарты могут иметь различия в форме представления или даже в содержании, например, в пояснительных примечаниях, указывающих, как выполнять требования стандарта, предпочтение тех или иных альтернатив и разновидностей.

2. Термин «эквивалентные стандарты» иногда используются для обозначения того же самого понятия, что и термин «гармонизированные стандарты».

*Заявление поставщика о соответствии* – процедура, посредством которой поставщик дает письменную гарантию, что продукция, процесс или услуга соответствуют заданным требованиям.

*Примечание.* Во избежание путаницы не следует использовать термин «самосертификация».

*Идентификация* – процедура, посредством которой устанавливается однозначное соответствие единицы продукции, наименования изделий технологическим операциям, сменам, датам контроля, исполнителям, номерам партий отгрузки, транспортным документам; идентификация должна обеспечивать прямую и обратную прослеживаемость.

*Изменение* – модификация, дополнение или исключение определенных фрагментов нормативного документа.

*Примечание.* Результаты изменения обычно представляются путем опубликования отдельного листка изменений к нормативному документу.

*Инструкция* – положение, описывающее действие, которое должно быть выполнено.

*Информационные ресурсы* – это деловые и технические данные и другая информация во всех формах, а также средства хранения и доступа к информации.

*Испытание* – техническая операция. Заключающаяся в установлении одной или нескольких характеристик данной продукции, процесса или услуги в соответствии с установленной процедурой.

*Испытания (процесс)* – действие по проведению одного или нескольких испытаний.

*Качество* – совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности.

*Квалифицирован* – статус, присваиваемый объекту, когда было продемонстрировано, что он имеет возможность выполнять установленные требования.

*Комплекс маркетинга* – совокупность управляемых составляющих маркетинговой деятельности организации или рыночная политика, «маркетинг-микс» (marketing mix). Составляющими комплекса маркетинга являются: товарная политика (product), продвижение товара на рынок (promotion), ценовая политика (price), сбытовая политика (place) и кадровая политика (personal). Маркетинг-микс называется также концепцией «5Р».

*Консенсус* – согласие, характеризующееся отсутствием возражений по существенным вопросам в процессе принятия нормативного документа (стандарта) у большинства заинтересованных сторон. Консенсус не предполагает полного единодушия.

*Контроль* – оценивание соответствия путем измерений, наблюдений, испытаний или калибрования соответствующих характеристик.

*Корректирующее действие* – действие, предпринятое для устранения причин существующего несоответствия, дефекта или другой нежелательной ситуации с тем, чтобы предотвратить их повторное возникновение.

*Примечания:*

1. Корректирующие действия могут повлечь за собой изменения как в методиках, так и в системах с целью достижения улучшения качества на всех этапах петли качества.

2. Существуют различия между «коррекцией» и «корректирующим действием»:

– термин «коррекция» имеет отношение к ремонту, переделке или регулировке и относится к устранению имеющегося несоответствия;

– термин «корректирующее действие» относится к устранению причин несоответствия.

*Критерии аккредитации* – требования, используемые аккредитующим органом, которым должна отвечать организация, чтобы быть аккредитованной.

*Лидеры* – это люди, осуществляющие координацию и обеспечение баланса интересов всех лиц, имеющих пай на предприятии, включая высшее руководство; всех других руководителей; лиц, работающих в группах и занимающих позиции лидеров; лиц, индивидуально взявших на себя роль лидера.

*Лицо с правом подписи (от имени аккредитованной лаборатории)* – лицо, признаваемое органом по аккредитации компетентным, чтобы подписывать протоколы испытаний аккредитованной лаборатории.

*Маркетинговые исследования* – систематическое определение данных, необходимых для анализа и решения стоящих перед организацией задач, сбор информации, ее изучение, обработка и представление результатов.

*Материалы* – предметы во всех формах существования, включая запасы сырья, готовой продукции и материалы, находящиеся в процессе обработки.

*Методика* – установленный способ осуществления деятельности.

*Миссия* – назначение или смысл существования предприятия.

*Метод испытания* – установленные технические правила проведения испытаний.

*Методическое положение* – положение, направленное на достижение соответствия; положение, указывающее один или несколько способов достижения соответствия требованию нормативного документа.

*Мультинациональный маркетинг* – одна из концепций международного маркетинга. Комплекс маркетинга дифференцирован и адаптирован для каждого из целевых рыночных сегментов, характеризующихся явными отличительными особенностями (национальными, культурными, традиционными и пр.).

*Наблюдение в ходе проверки качества* – констатация факта, сделанная в ходе проверки качества и основанная на объективном доказательстве.

*Надежность* – собирательный термин, используемый для описания характеристики готовности и влияющих на нее факторов – безотказности, ремонтнопригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта.

*Примечания:*

1. Надежность используется только для общих описаний, когда не применяются количественные термины.

2. Надежность является одним из зависящих от времени аспектов качества.

*Надзор за качеством* – непрерывное наблюдение и проверка состояния объекта, а также анализ протоколов с целью удостоверения того, что установленные требования выполняются.

*Примечания:*

1. Надзор за качеством может осуществляться потребителем или от его имени.

2. Надзор за качеством может включать управление наблюдением и проверкой, которое может предотвратить износ или ухудшение качества объекта (например, процесса) со временем.

*Недифференцированный маркетинг* – стратегия маркетинга, направленная на весь рынок с одним и тем же предложением в противовес разработке отдельного предложения для каждого (выбранного в качестве целевого) сегмента.

*Несоответствие* – невыполнение установленных требований.

*Нормативный документ* – документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов.

*Примечания:*

1. Термин «нормативный документ» является родовым термином, охватывающим такие понятия, как стандарты, документы технических условий, своды правил и регламенты.

2. Под документом следует понимать любой носитель с записанной в нем или на его поверхности информацией.

3. Термины, обозначающие различные виды нормативных документов, определяются в дальнейшем исходя из того, что документ и его содержание рассматриваются как единое целое.

*Нотификация* – официальное уведомление по какому-либо международному вопросу. Здесь – по вопросу, касающемуся международной стандартизации.

*Обеспечение качества* – все планируемые и систематически осуществляемые виды деятельности в рамках системы качества, а также подтверждаемые (если это требуется), необходимые для создания достаточной уверенности в том, что объект будет выполнять требования к качеству.

*Примечания:*

1. Существуют как внешние, так и внутренние цели обеспечения качества:

а) внутреннее обеспечение качества – в рамках организации обеспечение качества создает уверенность у руководства;

б) внешнее обеспечение качества – в контрактных или других ситуациях обеспечение качества создает уверенность у потребителей или других лиц.

2. Некоторые действия по управлению качеством и обеспечению качества взаимосвязаны.

3. Если требования к качеству не отражают полностью потребности пользователя, обеспечение качества может не создать достаточной уверенности.

*Общество* – все те лица, на которых воздействуют или, по их мнению, оказывают влияние предприятие, его продукция, услуги и процессы.

*Объект* – то, что может быть индивидуально описано и рассмотрено.

*Объективное доказательство* – информация, которая может быть доказана, основана на фактах и получена путем наблюдения, измерения, испытания или других средств.

*Объект стандартизации* – объект, который должен быть стандартизирован.

*Примечания:*

1. Здесь для отражения понятия «объект стандартизации» в широком смысле принято выражение «продукция, процесс или услуга», которое следует понимать как относящееся в равной степени к любому материалу, компоненту, оборудованию, системе, их совместимости, протоколу, функции, методу или деятельности.

2. Стандартизация может ограничиваться определенными аспектами любого объекта. Например, применительно к обуви размеры и критерии прочности могут быть стандартизированы отдельно.

*Обязательный стандарт* – стандарт, применение которого обязательно по общему закону или в соответствии с обязательной ссылкой в регламенте.

*Обязательное требование* – требование нормативного документа, подлежащее обязательному выполнению с целью достижения соответствия этому документу.

*Омологация* – официальное утверждение, приемка. По терминологии ЕЭК ООН относится к приемке оборудования дорожных транспортных средств.

*Операционный маркетинг* – совокупность целей, инструментов маркетинга и конкретизированного комплекса маркетинга по отношению к рынку, где происходит деятельность фирмы.

*Организация* – компания, корпорация, фирма, предприятие или учреждение, или их подразделения, объединенные или нет, общественные или частные, выполняющие самостоятельные функции и имеющие администрацию.

*Организационная структура* – обязательства, полномочия и взаимоотношения, представленные в виде схемы, по которой организация выполняет свои функции.

*Основная часть (нормативного документа)* – совокупность положений, составляющих содержание нормативного документа.

*Примечания:*

1. Основная часть стандарта включает общие элементы, относящиеся к его объекту и определениям, и основные элементы, передающие основные положения.

2. Для удобства главы основной части нормативного документа могут иметь форму приложений («нормативных приложений»), однако все другие («информативные») приложения могут быть только дополнительными элементами.

*Основополагающий стандарт* – стандарт, имеющий широкую область распространения или содержащий общие положения для определения области.

*Примечание.* Основополагающий стандарт может применяться непосредственно в качестве стандарта или служить основой для других стандартов.

*Ответственность за качество продукции* – общий термин, описывающий обязательства, возлагаемые на изготовителя или других лиц, по возмещению ущерба из-за нанесения травм, повреждения собственности или другого вреда, вызванного продукцией.

*Ответственный маркетинг* – маркетинг, концепция которого сопряжена с двумя ключевыми идеями – забота о благополучии покупателей, а не об удовлетворении их краткосрочных потребностей; ориентация фирмы на долгосрочное благополучие общества в целом. Примером может служить концепция ответственного маркетинга, о которой заявляет корейская фирма «Самсунг электроникс», имея в виду российский рынок – главное требование, которым она руководствуется при создании новых товаров, является абсолютная безопасность

для здоровья пользователей (особенно детей), конечно, наряду с высоким качеством, надежностью и приемлемой ценой.

*Оценка качества* – систематическая проверка, насколько объект способен выполнять установленные требования.

*Примечания:*

1. Оценка качества может производиться с целью определения возможностей поставщика в области качества. В этом случае, в зависимости от конкретных условий, результат оценки качества может быть использован в целях квалификации, одобрения, регистрации или аккредитации.

2. С термином «оценка качества» может использоваться дополнительный определитель в зависимости от области деятельности [например, процесс, персонал, система] и времени (например, до контракта) оценки качества, например, «предконтрактная оценка качества процесса».

3. Общая оценка качества поставщика может также включать оценку финансовых и технических ресурсов.

*Охрана окружающей среды* – защита окружающей среды от неблагоприятного воздействия продукции, процессов и услуг.

*Параметр* – измеряемая или количественная характеристика либо измеряемое или количественно определяемое свойство.

*Партнерство* – это долгосрочные рабочие взаимоотношения между двумя или более сторонами.

*Переделка* – действие, предпринятое в отношении несоответствующей продукции с тем, чтобы она удовлетворяла исходным установленным требованиям.

*Примечание.* Переделка является одним из видов устранения несоответствующей продукции.

*Пересмотр* – внесение всех необходимых изменений в содержание и оформление нормативного документа.

*Примечание.* Результаты пересмотра представляются путем опубликования нового издания нормативного документа.

*Персонал* – все лица, нанятые предприятием, включая служащих с полной занятостью, с частичной занятостью, временно занятых или работающих по договору.

*Петля качества* – схематическая модель взаимозависимых видов деятельности, влияющих на качество продукции (услуги) на всех стадиях ее жизненного цикла – от определения потребности и проектирования до утилизации.

*Планирование качества* – деятельность, которая устанавливает цели и требования к качеству и применению элементов системы качества.

*Позиционирование товара* – определение его места на рынке в условиях конкуренции с другими аналогичными предложениями с учетом изученных потребительских предпочтений и политики конкурентов.

*Политика и стратегия* – это главная концептуальная основа для работы предприятия, определяющая ее миссию, ценности, перспективный план, цели и стратегию.

*Положение (нормативного документа)* – логическая единица содержания нормативного документа, которая имеет форму сообщения, инструкции, рекомендации или требования.

*Поправка* – устранение из опубликованного текста нормативного документа опечаток, лингвистических и других подобных ошибок.

*Примечание.* Результаты поправки могут быть представлены соответственно путем опубликования отдельного листка поправок или нового издания нормативного документа.

*Поставщики* – те, кто предоставляет продукцию или услуги. Поставщики могут быть внешними или внутренними.

*Потребитель* – получатель продукции, представляемой поставщиком.

*Предупреждающее действие* – действие, предпринятое для устранения причин потенциального несоответствия, дефекта или другой нежелательной ситуации с тем, чтобы предотвратить их возникновение.

*Примечание.* Эти предупреждающие действия могут повлечь за собой изменения как в методиках, так и в системах с целью достижения улучшения качества на всех этапах петли качества.

*Проверка* – подтверждение путем экспертизы и представления объективного доказательства того, что установленные требования были выполнены.

*Примечания:*

1. При проектировании и разработке проверка означает процесс проведения экспертизы результатов данной деятельности с целью определения ее соответствия входным требованиям.

2. Слово «проверено» используется для обозначения соответствующего статуса.

*Проверка* – деятельность, заключающаяся в рассмотрении нормативного документа в целях выяснения, следует ли переутвердить этот документ или его необходимо пересмотреть или отменить.

*Проверка качества* – систематический и независимый анализ, позволяющий определить соответствие деятельности и результатов в области качества запланированным мероприятиям, а также эффективность внедрения мероприятий и их соответствие поставленным ценам.

*Примечания:*

1. Проверка качества (аудит) применяется в основном (но не только) к системе качества или ее элементам, таким, как процессы, продукция или услуги. Подобные аудиты часто называют «проверкой (аудитом) системы качества», «проверкой (аудитом) качества процесса», «проверкой (аудитом) качества продукции», «проверкой (аудитом) качества услуги».

2. Проверки качества проводятся лицами, которые не несут непосредственной ответственности за проверяемые участки. При этом желательно взаимодействие с персоналом проверяемых участков.

3. Одной из целей проверки качества является оценка необходимости проведения улучшения или корректирующих действий. Следует проводить разграничение между аудитом и деятельностью по надзору за качеством или контролю, осуществляемой с целью управления или приемки продукции.

4. Проверки качества (аудиты) могут проводиться для удовлетворения внутренних или внешних потребностей.

*Продукция* – результат деятельности или процессов.

*Программа качества* – документ, регламентирующий конкретные меры в области качества, ресурсы и последовательность деятельности, относящейся к специфической продукции, проекту или контракту.

*Примечания:*

1. Программа качества обычно содержит ссылки на части руководства по качеству, применяемые к отдельным случаям.

2. В зависимости от назначения программы она иногда называется «программа обеспечения качества» или «программа административного управления качеством».

*Прослеживаемость* – возможность проверки наличия составляющих системы обеспечения качества, при этом они должны не только реализовываться практически, но и быть документально оформлены.

*Протокол испытаний аккредитованной лаборатории* – протокол испытаний, который включает в себя заявление испытательной лаборатории о том, что она является аккредитованной для проведения упомянутого испытания и что ис-

питание было проведено в соответствии с условиями, установленными органом по аккредитации.

*Процесс квалификации* – процесс демонстрации возможности объекта выполнять установленные требования.

*Примечание.* Для обозначения этого процесса иногда используется термин «квалификация».

*Протокол испытаний* – документ, содержащий результаты испытаний и другую информацию, относящуюся к испытаниям.

*Разрешение на отклонение* – письменное разрешение на использование или выпуск продукции, которая не соответствует установленным требованиям.

*Примечание.* Разрешение на отклонение распространяется на партию продукцию, которая имеет конкретные несоответствующие характеристики в пределах определенных отклонений на ограниченный период времени или на ограниченное количество.

*Регистрация* – процедура, посредством которой какой-либо орган указывает соответствующие характеристики продукции, процесса или услуги, или особенности органа или лица в соответствующем общедоступном перечне.

*Рекомендация* – положение, содержащее совет или указание.

*Рециклинг* – повторное промышленное использование отходов производства и потребления. Знак рециклинга означает возможность переработки отходов или то, что товар получен из вторичного сырья.

*Сегментация* – процесс выделения на рынке групп потребителей, предъявляющих однородные (сходные) требования к предлагаемым товарам (услугам).

*Сертификация* – процедура, посредством которой третья сторона дает письменную гарантию, что продукция, процесс или услуга соответствуют заданным требованиям.

*Соответствие* – соответствие продукции, процесса или услуги установленным требованиям.

*Стандарт* – документ, разработанный на основе консенсуса и утвержденный признанным органом, в котором устанавливаются для всеобщего и многократного использования правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов, и который направлен на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области.

*Примечание.* Стандарты должны быть основаны на обобщенных результатах науки, техники и практического опыта и направлены на достижение оптимальной пользы для общества.

*Стандартизация* – деятельность, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления положений для всеобщего и многократного использования в отношении реально существующих или потенциальных задач.

*Примечания:*

1. В частности, эта деятельность проявляется в процессах разработки, опубликования и применения стандартов.

2. Важнейшими результатами деятельности по стандартизации являются повышение степени соответствия продукции, процессов и услуг их функциональному назначению, устранению барьеров в торговле и содействие научно-техническому сотрудничеству.

*Стандарты, гармонизированные на международном уровне* – стандарты, гармонизированные с международным стандартом.

*Стандарт на продукцию* – стандарт, устанавливающий требования, которым должны удовлетворять продукция или группа, с тем чтобы обеспечить ее соответствие своему назначению.



*Примечания:*

1. Стандарт на продукцию может включать, кроме требования соответствия назначению, непосредственно или с помощью ссылки, такие аспекты, как термины и определения, отбор проб, испытания, упаковка и этикетирование, а иногда технологические требования.

2. Стандарт на продукцию может быть полным или неполным в зависимости от того, устанавливает ли он все или только часть необходимых требований. В этом смысле различают стандарты размеров, стандарты на материалы и стандарты правил поставки.

*Стандарт на процесс* – стандарт, устанавливающий требования, которым должен удовлетворять процесс, с тем, чтобы обеспечить соответствие процесса его назначению.

*Стандарт методов испытаний* – стандарт, устанавливающий методы испытаний, иногда дополненный другими положениями, касающимися испытаний, как, например, отбор проб, использование статистических методов и порядок проведения испытаний.

*Стандарт терминов и определений* – терминологический стандарт – стандарт, распространяющийся на термины, к которым, как правило, дают определения, а в некоторых случаях примечания, иллюстрации, примеры и т.д.

*Степень подтверждения* – величина доказательства, обеспечивающая уверенность в том, что установленные требования выполняются.

*Примечания:*

1. Степень подтверждения может колебаться в пределах от заявления о наличии до предоставления детальной документации и объективного доказательства выполнения.

2. Величина подтверждения зависит от таких критериев, как экономика, сложность, новизна, безопасность и соображения экологии.

*Тип транспортного средства* – транспортные средства, не имеющие между собой существенных различий по характеристикам, содержащимся в конкретных правилах ЕЭК ООН и национальных стандартах.

*Точка задержки* – пункт, определенный в соответствующем документе, за пределами которого деятельность не должна продолжаться без санкции на то определенной организации или полномочного органа (лица).

*Примечание.* Санкция на продолжение деятельности за пределами точки задержки обычно дается в письменной форме, но также может быть получена и через уполномоченную компьютерную систему.

*Требования к приемке* – являются по существу правилами, которые устанавливают обязательные условия приемки продукции по качеству и количеству, виды и программы испытаний или контроля качества (количества).

*Требования к транспортировке и хранению* – устанавливают условия, которые необходимо соблюдать в процессе перевозок и хранения продукции с целью обеспечения сохранности ее качества, количества, безопасности. Условия (правила) касаются видов транспорта и транспортных средств, допустимых внешних воздействий на продукт (механические, климатические и др.), места хранения, условий складирования, особых правил и сроков хранения (для отдельных видов продукции).

*Требования к упаковке* – требования, которые устанавливают количество единиц продукции в одной упаковке, требования к упаковочным материалам, к способу упаковывания в зависимости от условий транспортировки, хранения и т.д.

*Требования надежности* – требования по выполнению продукцией своих функций с заданной эффективностью в определенном интервале времени и сохранению их в процессе транспортировки, хранения, ремонта. Количественные параметры надежности – безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

*Требования назначения* – требования к свойствам продукции, характеризующим ее основные функции, для выполнения которых она предназначена в заданных условиях. Сюда же относятся совместимость и взаимозаменяемость. В зависимости от вида продукции требования назначения могут относиться к производительности, точности и скорости обработки (станок); содержанию основного вещества, примесей, добавок, калорийности (пищевой продукт). Совместимость может быть функциональной, геометрической, биологической, электромагнитной, электрической, программной и др.

*Требования ресурсосбережения* – требования к экономному использованию сырья, материалов, топлива, энергии, трудовых ресурсов при производстве продукции и при регламентированном режиме использования продукта по назначению. Количественными показателями этих требований могут быть удельный расход сырья, материалов, энергии и т.п., а также коэффициент полезного действия, трудоемкость по отношению к единице потребительских свойств и т.п.

*Требования общества* – обязательства, вытекающие из закона, инструкций, правил, кодексов, уставов и других соображений.

*Требования по эксплуатации* (ремонту, утилизации) – касаются правил подготовки и ввода в эксплуатацию, порядка монтажа (для соответствующих изделий), технического обслуживания, основных условий использования. Выполнение этих требований обеспечит работоспособность и безопасность продукта в соответствии с его качественными характеристиками.

*Требования технологичности* – характеризуют приспособленность продукции к переработке, эксплуатации, ремонту с минимальными затратами при заданных значениях параметров качества.

*Требования эргономики* – требования к обеспечению согласованности технических характеристик продукции с характеристиками и свойствами человеческого организма, размерами и особенностями фигуры человека.

*Унификация* – оптимизация количества размеров или видов продукции, процессов или услуг, необходимых для удовлетворения основных потребностей. Унификация, как правило, связана с сокращением многообразия. В русской версии термин «унификация» обычно понимают как приведение к единообразию технических характеристик изделий, документации, терминов, обозначений и т.п.

*Уровень развития научно-технического прогресса* – результат обобщенных достижений науки, техники и практического опыта применительно к продукции, процессам, услугам в определенной области.

*Финансовые ресурсы* – это краткосрочный капитал, требуемый для повседневного ведения бизнеса, а также капитальные вложения из различных источников, требуемые для долгосрочного финансирования деятельности предприятия.

*Ценности* – характеристики и ожидания, которые описывают, как ведет себя персонал предприятия, и на основе которых строятся все деловые взаимоотношения (доверие, поддержка, правдивость).

*Экологический аспект деятельности* – элемент деятельности организации, ее продукции или услуг, связанных с взаимодействием с окружающей средой.

*Эксперт-аудитор по качеству* – специалист, имеющий квалификацию для проведения проверки качества.

*Примечание.* Эксперт-аудитор по качеству, назначенный для руководства проверкой качества, называется «главным экспертом-аудитором по качеству».

*Эксперт по аттестации лаборатории* – лицо, которое осуществляет все или некоторые функции, относящиеся к аттестации лаборатории.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Принципы организации комплексной системы управления качеством на предприятии

Рассмотрим наиболее характерную организационную комплексную систему управления качеством продукции (КСУКП) на предприятии, состоящем из научно-производственного объединения (НПО), разрабатывающего РЭС, и опытного завода.

Взаимосвязь подразделений КСУКП представлена на рис. П.1. Здесь объединены три самостоятельно действующих подсистемы:

- подразделения службы главного конструктора;
- подразделения службы главного технолога;
- подразделения службы технического контроля качества (СТКК).

Потенциал первой подсистемы составляют сотрудники подразделений службы главного конструктора и службы главного технолога – разработчики РЭС – схемотехники, конструкторы и технологи. Они создают, после освоения технологических процессов производства, конструкторскую и технологическую документацию, по которой изготавливают изделия.

Потенциал второй подсистемы составляют специалисты цехов и участков основного производства, производственный персонал (рабочие различных профессий и т.п.).

Третья подсистема включает в себя подразделения отдела технического контроля (лаборатории организации и управления качеством, отдела испытаний и т.п.), образуя единую службу управления качеством.

#### **Служба технического контроля качества (СТКК)**

Служба технического контроля качества предприятия является комплексом подразделений, осуществляющих координацию и контроль за выполнением на предприятии работ по обеспечению и повышению качества разрабатываемой и выпускаемой продукции.

Она осуществляет свои функции совместно с другими подразделениями предприятия.

Взаимоотношения между подразделениями предприятия определяются структурой предприятия, действующими положениями о подразделениях и должны быть направлены на обеспечение и повышение качества и надежности разрабатываемых и выпускаемых изделий.

Службу технического контроля качества возглавляет заместитель директора по качеству, который подчиняется непосредственно руководителю предприятия.

#### **Основные задачи СТКК:**

1. Предотвращение выпуска продукции, не соответствующей требованиям стандартов, технических условий, конструкторской и технологической документации, утвержденным образцам.

2. Обеспечение функционирования, развития и совершенствования комплексной системы управления качеством продукции (КСУКП) на предприятии.

#### **Основные функции СТКК:**

1. Контроль, анализ и оценка промежуточных результатов НИР и ОКР, проведение испытаний и приемка опытных образцов, установочных серий и серийной продукции.

2. Контроль качества материалов, полуфабрикатов, деталей, сборочных единиц и готовой продукции, поступающих на предприятие по кооперации, и оформление в установленном порядке документов, удостоверяющих их качество.

3. Организация сбора, обобщение и анализ статистических и других данных о потребительских качествах продукции, а также участие в разработке мероприятий по устранению выявленных конструкторских ошибок и заводских дефектов изделий и предупреждению брака. Контроль за эффективностью этих мероприятий.

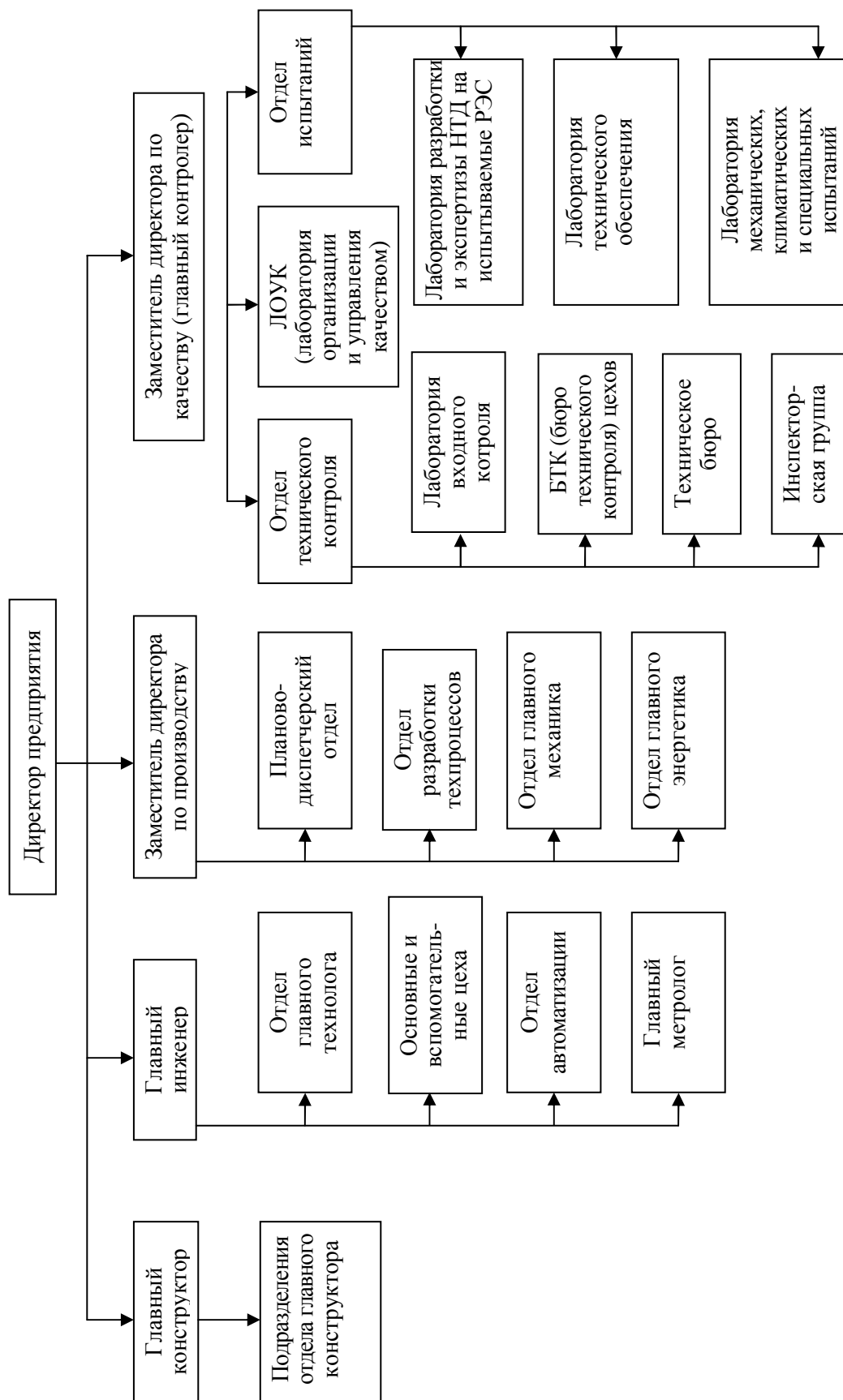


Рис. П.1.1. Взаимосвязь подразделений КСУКП

4. Участие в разработке целевых программ повышения качества продукции предприятия, планов обеспечения качества, а также нормативно-технических документов (НТД), регламентирующих функционирование системы управления качеством продукции.

5. Разработка предложений по совершенствованию системы стимулирования выпуска продукции высокого качества и исключение возможности выпуска недоброкачественной продукции.

6. Координация и методическое руководство работами по обеспечению функционирования, развитию и совершенствованию КСУКП на предприятии.

7. Организация работ с поставщиками по повышению качества комплектующих изделий, подготовка материалов по привлечению к ответственности заводов – поставщиков некачественных изделий.

8. Участие в рассмотрении рекламаций и претензий потребителей к качеству продукции совместно с другими подразделениями и представителем заказчика и принятие решения по ним.

9. Участие в подготовке и проведении аттестации и сертификации продукции.

10. Участие совместно со службами главного инженера предприятия, службами главного конструктора, главного технолога и представителями заказчика в приемке технической документации.

11. Участие во внедрении прогрессивных методов контроля, анализа и оценки качества продукции, а также средств механизации и автоматизации контрольных операций.

12. Представление, в установленном порядке, отчетности по качеству продукции.

В состав СТКК предприятия входят следующие подразделения:

- ОТК – отдел технического контроля;
- лаборатория организации и управления качеством (ЛОУК);
- отдел испытаний;

Возглавляет СТКК главный контролер, имеющий следующие права:

- прекращать приемочный контроль продукции на любом этапе ее производства и приостанавливать отправку продукции внутризаводским или внешним потребителям в тех случаях, когда эта продукция не соответствует установленным требованиям или нарушается технология ее изготовления;

- запрещать передачу технической документации на изделие в производство, если ее качество и комплектность не соответствуют требованиям ЕСКД (или заводской и отраслевой НТД), а также в случаях неудовлетворительных результатов испытаний опытных образцов или отсутствия необходимых средств и методов контроля до устранения выявленных недостатков;

- возобновлять приемочный контроль продукции и давать разрешение на отгрузку продукции только после устранения причин, вызвавших возникновение дефектов продукции, устранения дефектов в ранее изготовленной, но еще не принятой ОТК и неотгруженной продукции, устранения нарушений технологического процесса и их последствий;

- представлять, от имени предприятия, по направлениям своей деятельности без особой на то доверенности;

- принимать участие в проверках качества продукции, проводимых контролирующими организациями;

- участвовать в разработке конструкторской документации по полноте требований к качеству и надежности, в выборе методов и средств контроля, согласовании технологи-

ческих условий и технологических процессов в части операций контроля и испытаний, в установлении требований по надежности и гарантийным обязательствам;

- участвовать в работе заводской государственной комиссии по приемке разработок;
- требовать от соответствующих подразделений предоставления расчетов, технических условий, чертежей, схем, технологии и другой действующей нормативно-технической документации, необходимой для приемки изделий и проведения испытаний, результатов испытаний, измерений, анализов, справок и материалов о выполнении мероприятий по улучшению качества и других сведений, относящихся к качеству разрабатываемой и изготавливаемой продукции, а также своевременного извещения обо всех изменениях, вносимых в технические условия, чертежи, схемы, технологическую и другую нормативно-техническую документацию;

- давать оценку и заключение о работе подразделений предприятия по вопросам качества разработок продукции;

- требовать от соответствующих технических служб разработки мероприятий, направленных на совершенствование методов контроля, механизации и автоматизации контрольных операций и снижение трудоемкости контроля, а также разработки и внедрения научной организации труда на контрольных операциях, в том числе с применением вычислительной техники;

- контролировать исполнение всех видов мероприятий по повышению качества и поддержанию эксплуатационной надежности выпускаемой продукции;

- требовать от начальников цехов и отделов предприятия равномерного (ритмичного) предъявления на контроль продукции или в соответствии с согласованными с СТКК графиками.

Главный контролер несет ответственность:

- за ненадлежащее выполнение возложенных на СТКК задач и функций;
- за неправильность и неполноту использования предоставленных прав;
- за непроведение работ по развитию и совершенствованию СТКК;
- за выпуск продукции, несоответствующей техническим условиям и стандартам;
- за состояние организации, полноту, правильность и своевременность технического контроля качества, качество разработки продукции;

- за неправильное оформление документов, удостоверяющих качество и комплектность выпускаемой продукции;

- за несоблюдение действующего законодательства и невыполнение указаний вышестоящих органов по вопросам качества продукции.

#### **Отдел технического контроля**

Отдел технического контроля (ОТК) является самостоятельным структурным подразделением службы технического контроля качества.

Начальник ОТК осуществляет административное, техническое и хозяйственное руководство и контроль за деятельностью внутренних структурных звеньев отдела в объеме возложенных на них задач.

Отдел технического контроля освобождается от контроля качества и комплектности оборудования, строительных и хозяйственных материалов, измерительной и стандартной аппаратуры, инструментов, поступающих на предприятие.

Такой контроль осуществляется соответственно отделами главного механика, главного энергетика, капитального строительства, инструментальным, и метрологии.

Предприятие может представлять на испытание, предъявлять заказчику или приемочным комиссиям и реализовывать только продукцию, принятую ОТК. На продукцию должны быть оформлены в установленном порядке необходимые сопроводительные документы, удостоверяющие ее соответствие установленным требованиям (если продукция подлежит приемке заказчиком, то она может быть реализована только после ее приемки заказчиком).

Осуществляемый ОТК контроль качества готовой продукции не освобождает начальников цехов и отделов, мастеров и другой руководящий и производственный персонал предприятия от ответственности за изготовление и выпуск руководимыми ими участками производства некачественной и некомплектной продукции, а начальников подразделений, осуществляющих контрольные функции, – от ответственности за правильность даваемых ими заключений и анализов по вопросам качества изделий.

Перевод отдельных специалистов производства и подразделений на самоконтроль не снимает с ОТК ответственности за выпуск продукции, несоответствующей установленным требованиям, и не освобождает его от выполнения им контролирующих функций. Отдел технического контроля осуществляет технический контроль продукции в той мере, в какой это необходимо для гарантии выпуска продукции, соответствующей ТУ и стандартам.

Система технического контроля (объекты контроля, контрольные операции и их последовательность, техническое оснащение, режимы, методы, средства механизации и автоматизации контрольных операций) является неотъемлемой частью производственного процесса, разрабатывается одновременно с разработкой технологии производства и согласовывается с ОТК.

**Основными задачами ОТК являются:**

- предотвращение выпуска продукции, несоответствующей установленным требованиям, исключение возможности поставки такой продукции потребителю;
- контроль качества поступающих на предприятие материалов и комплектующих изделий, контроль качества и приемка изготовленных деталей, сборочных единиц и изделий в целом в соответствии с нормативной документацией.

В состав ОТК входят следующие подразделения:

- лаборатория входного контроля;
- техническое бюро;
- бюро технического контроля (БТК) цехов;
- инспекторская группа.

**Основными функциями ОТК являются:**

1. Входной контроль поступающих на предприятие материалов, комплектующих изделий в соответствии с перечнями и технологией контроля, сертификатами, паспортами, техническими условиями и другими документами поставщика.

2. Оформление документов, удостоверяющих соответствие поступившей продукции установленным требованиям, а также подготовка рекламационных актов поставщикам сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий, забракованным в процессе входного контроля, производства и испытаний.

3. Введение статистического учета по анализу качества материалов и комплектующих изделий и оформление результатов анализа в установленном порядке.

4. Контроль качества изготавливаемой продукции на всех стадиях производства. Определение соответствия деталей, сборочных единиц и готовых изделий стандартам, техническим условиям, чертежам и эталонам в соответствии с утвержденным техпроцессом.

5. Предъявление, совместно с работниками других подразделений, готовой продукции заказчику в случаях, предусмотренных условиями ее поставки, а при отсутствии на предприятии заказчика – проведение, с письменного разрешения заказчика, приемно-сдаточных испытаний, участие в проведении квалификационных (установочных) и периодических испытаний продукции.

6. Контроль маркировки продукции, качества тары, консервации и упаковки продукции, а также выполнения требований технологической документации по подготовке транспортных средств, предназначенных под погрузку, качества погрузки и крепления готовой продукции.

7. Сбор и обработка информации о конструктивных, технологических и заводских дефектах, выявленных при изготовлении изделий, подготовка рекомендаций по ее оперативному использованию; участие в разработке мероприятий по повышению качества продукции, контроль за реализацией этих мероприятий.

8. Учет, обобщение и анализ брака в производстве по видам работ, причинам и виновникам.

9. Обобщение данных о причинах отказов РЭС и комплектующих изделий к ним и разработка совместно с другими подразделениями предприятия рекомендаций и предложений, направленных на устранение и предупреждение причин отказов.

10. Участие в подготовке и проведении аттестации и сертификации выпускаемой продукции.

11. Выборочный и инспекционный контроль состояния производства, качества изготовления продукции и соблюдения технологической дисциплины на любом этапе производства.

12. Систематический контроль состояния рабочих мест и культуры производства на производственных участках.

Права ОТК осуществляются начальником ОТК, его заместителем и другими работниками ОТК в соответствии с распределением обязанностей, установленным должностными инструкциями.

Начальник ОТК несет ответственность:

- за ненадлежащее выполнение возложенных на ОТК задач и функций;
- за неправильность и неполноту использования предоставленных прав, выпуск некачественной, некомплектной и не соответствующей техническим условиям или стандартам продукции;
- за неправильную или необъективную оценку качества продукции, выпускаемой предприятием;
- за несвоевременное представление установленной отчетности по качеству продукции;
- за полноту и правильность проведения контроля в соответствии с действующей технической документацией;
- за состояние организации технического контроля и своевременность проверки предъявленной ОТК продукции на всех участках производства согласно технологическим процессам;
- за неправильное оформление документов, удостоверяющих качество и комплектность выпускаемой продукции;
- за необоснованную остановку приемки, изготовления и отгрузки продукции;



- за организацию инструктажа, технического обучения и повышения уровня квалификации работников ОТК;
- за организацию безопасности условий труда работников ОТК;
- за исполнительную дисциплину в отделе.

### **Лаборатория организации управления качеством (ЛОУК)**

Лаборатория организации управления качеством является самостоятельным структурным подразделением службы технического контроля качества (СТКК) и подчиняется непосредственно главному контролеру.

#### **Основными задачами ЛОУК являются:**

- обеспечение методического руководства и координация деятельности по обеспечению и улучшению качества продукции, развитию и совершенствованию системы управления качеством продукции, а также развитию научного и производственного потенциала предприятия;
- организация внедрения на предприятии системы управления качеством выпускаемой продукции на базе стандартов;
- организация и координация работ по снижению претензий к качеству выпускаемой продукции и уменьшению потерь от брака на основе обеспечения уровня качества продукции;
- совершенствование организации работ служб технического контроля качества;
- внедрение и совершенствование автоматизированных систем управления качеством продукции.

Права и функции ЛОУК осуществляются начальником и другими работниками ЛОУК в соответствии с распределением обязанностей, установленными должностными инструкциями.

#### **Начальник ЛОУК имеет право:**

- контролировать деятельность всех подразделений и служб предприятия по достижению необходимого уровня качества выпускаемой продукции, повышению эффективности и качества работы подразделений и отдельных исполнителей;
- согласовывать стандарты предприятия и другие нормативно-технические документы по направлениям деятельности СТКК;
- пользоваться в установленном порядке статистическими, отчетными и другими материалами предприятия, необходимыми для проведения анализа и оценки качества выпускаемой продукции, эффективности и качества работы подразделений предприятия;
- участвовать в работе по подведению итогов производственной деятельности подразделений предприятий.

#### **Начальник ЛОУК несет ответственность:**

- за ненадлежащее выполнение возложенных на подразделение задач и функций;
- за неправильность и неполноту использования предоставленных прав;
- за несвоевременное представление отчетности руководству предприятия и вышестоящим организациям;
- за неполноту и недостаточность представляемой информации о качестве выпускаемой продукции, качестве работы подразделений предприятия, эффективности функционирования системы управления, качестве и фактическом объеме выполненных работ по ее развитию и совершенствованию.

### **Отдел испытаний**

Включает в себя следующие лаборатории:

- разработки и экспертизы НТД на испытываемые РЭС;
- механических, климатических и специальных испытаний;
- технического обеспечения.

Отдел испытаний проводит все работы в тесном контакте с отделом главного конструктора, отделом главного технолога и отделом главного метролога. Совместно с разработчиками, конструкторами, технологами, метрологами участвует во всех этапах создания РЭС, начиная НИР и заканчивая периодическими и эксплуатационными испытаниями.

Основными задачами отдела испытаний являются:

- экспертиза ТЗ на разработку РЭС в части наличия испытательного оборудования, методик испытаний, обоснования требований, предъявляемых к РЭС по условиям эксплуатации, транспортирования;
- совместная работа с конструкторами по выбору элементов и материалов, обеспечивающих устойчивость разрабатываемых РЭС к условиям эксплуатации, транспортирования, в соответствии с принятыми методами проведения испытаний;
- входной контроль материалов, комплектующих РЭС, на устойчивость к внешним воздействующим факторам при эксплуатации и транспортировании РЭС;
- участие во всех видах испытаний, в том числе и в реальных условиях эксплуатации;
- экспертиза ТУ в части рекомендованных методов и средств испытаний и применяемого испытательного оборудования;
- совместная работа с конструкторами и технологами по выбору испытательного оборудования;
- совместная работа с метрологической службой по подготовке и проведению аттестации испытательного оборудования и методик проведения испытаний;
- анализ состояния испытаний на предприятии и разработка на его основе мероприятий по устранению выявленных недостатков;
- монтаж, техническое обслуживание, анализ эксплуатационных свойств испытательного оборудования;
- информирование разработчиков о создании новых НТД по испытаниям;
- планирование, нормирование работ по испытаниям, анализ загрузки испытательного оборудования;
- контроль за соответствием применяемых методов испытаний и испытательного оборудования требованиям стандартов, методических указаний и технических условий;
- разработка ТЗ на создание испытательного оборудования;
- выявление и анализ причин отрицательных результатов испытаний и брака выпускаемой продукции.

**Перечень испытаний на воздействие климатических факторов**

Наименование испытаний	№ испытаний	Вид испытаний		Обозначение стандарта, содержащего метод испытания, или номер пункта приложения Е
		Предварительные, приемочные (государственные, межведомственные, ведомственные), квалификационные, типовые	Периодические	
1	2	3	4	5
Испытание на воздействие температуры среды при эксплуатации	201	+	+	Е.1.13
Испытание на воздействие верхнего значения температуры среды при транспортировании и хранении	202	+	–	Е.1.13
Испытание на воздействие нижнего значения температуры среды при эксплуатации	203	+	+	Е.1.13
Испытание на воздействие нижнего значения температуры среды при транспортировании и хранении	204	+	–	Е.1.13
Испытание на воздействие изменения температуры среды	205	+	Н	Е.1.13
Испытание на воздействие инея с последующим оттаиванием	206	+	–	Е.1.13
Испытание на воздействие влажности воздуха: – длительное – ускоренное – в условиях выпадения росы	207	+ – +	– + +	Е.1.14
Испытание на воздействие влажности воздуха кратковременное	208	–	Н	Е.1.14
Испытание на воздействие пониженного атмосферного давления	209	+	Н	Е.1.15

Окончание табл.

1	2	3	4	5
Испытание на воздействие повышенного давления воздуха или другого газа	210	+	Н	Е.1.15
Испытание на воздействие солнечного излучения	211	–	–	Е.1.16
Испытание на воздействие пыли (песка)	212	+	–	Е.1.19
Испытание на воздействие плесневых грибов	214	+	–	ГОСТ 9.048
Испытание на воздействие соляного тумана	215	+	–	Е.1.17
Испытание на воздействие статического гидравлического давления	216	+	Н	Е.1.18
Испытание на водонепроницаемость	217	+	Н	Е.1.18
Испытание на воздействие дождя	218	+	–	Е.1.18
Испытание на каплезащищенность	219	+	–	Е.1.18
Испытание на водозащищенность	220	+	Н	Е.1.18
Испытание на брызгозащищенность	221	+	Н	Е.1.18
Испытание на работоспособность при воздействии гололеда	222	+	–	Е.1.14
Испытание на воздействие быстрого изменения атмосферного давления	223	+	–	Е.1.15
Испытание на воздействие нижнего значения влажности воздуха или другого газа	224	+	–	Е.1.14

Допустимые отклонения воздействующих климатических факторов

Воздействующий фактор	Допустимое отклонение
Температура, °С: от минус 85 до 200 св. 200	$\pm 2$ °С <sup>1)</sup> $\pm 2$ °С <sup>1)</sup>
Относительная влажность	$\pm 3$ %
Пониженное давление, ГПа (мм рт. ст.): 6,7 (5) и выше ниже 6,7 (5)	$\pm 5$ % или $\pm 1,33$ ГПа ( $\pm 1$ мм рт. ст.); выбирают большее значение В соответствии с требованиями стандартов и ТУ на изделие и ПИ
Повышенное избыточное давление, Па (кгс/см <sup>2</sup> )	$\pm 20$ %
Концентрация пыли, г/м <sup>3</sup>	$\pm 20$ %

<sup>1)</sup> Если рабочие характеристики оборудования не обеспечивают указанных отклонений, допускается (за исключением испытаний на воздействие влажности) увеличение значений отклонений от нормированных в пределах:

- $\pm 3$  °С при температуре до 100 °С включ.;
- $\pm 5$  °С        "-"        от 100 до 200 °С;
- $\pm 10$  °С       "-"        св. 200 °С.

**Перечень испытаний на воздействие механических факторов**

Наименование испытаний	№ испытаний	Вид испытаний		Обозначение стандарта, содержащего метод испытания, или номер пункта табл. 4
		Предварительные, приемочные (государственные, межведомственные, ведомственные), квалификационные, типовые	Периодические	
1	2	3	4	5
Определение динамических характеристик конструкции	100	+	- <sup>1)</sup>	ГОСТ 30630.1.1
Испытание на проверку отсутствия резонансных частот <sup>2)</sup> конструкции в данном диапазоне частот	101	+	-	ГОСТ 30630.1.1
Испытание на устойчивость при воздействии синусоидальной или случайной широкополосной вибрации (испытание на виброустойчивость)	102	+	Н	ГОСТ 30630.1.2
Испытание на прочность при воздействии синусоидальной или случайной широкополосной вибрации длительное (испытание на вибропрочность длительное)	103	+	Н	ГОСТ 30630.1.2
Испытание на прочность при воздействии синусоидальной вибрации кратковременное (испытание на вибропрочность кратковременное)	103	-	Н	ГОСТ 30630.1.2
Испытание на прочность при воздействии механических ударов многократного действия (испытание на ударную прочность)	104	+	Н	Е.1.5
Испытание на устойчивость при воздействии механических ударов многократного действия (испытание на ударную устойчивость)	105	+	Н	Е.1.5
Испытание на воздействие механических ударов одиночного действия (испытание на воздействие одиночных ударов)	106	+	Н	Е.1.5

Окончание табл.

1	2	3	4	5
Испытание на воздействие линейного ускорения	107	+	–	Е.1.6
Испытание на воздействие акустического шума	108	+	–	Е.1.7
Испытание выводов на воздействие растягивающей силы	109	+	Н	Е1.8
Испытание гибких проволочных и ленточных выводов на изгиб	110	+	Н	Е1.8
Испытание гибких лепестковых выводов на изгиб	111	+	Н	Е1.8
Испытание гибких проволочных выводов на скручивание	112	+	Н	Е1.8
Испытание резьбовых выводов на воздействие крутящего момента	113	+	Н	Е1.8
Испытание на воздействие синусоидальной вибрации с повышенным значением амплитуды ускорения	114	+	–	ГОСТ 30630.1 .2
Испытание на прочность при падении	115	+	–	Е.1.9
Испытание на устойчивость при воздействии качки (длительных наклонов)	116	+	Н	Е.1.9
Испытание на воздействие воздушного потока	117	+	–	Е.1.20
Испытание на воздействие ударов по оболочке изделия	118	+	Н	Е.1.12

<sup>1)</sup> Если иное не установлено в стандартах и ТУ на изделия.

<sup>2)</sup> Под термином «резонансные частоты» понимают также собственные частоты.

<sup>3)</sup> Допускается проводить испытания один раз при предварительных, приемочных или квалификационных испытаниях, что должно быть подтверждено комиссией по приемке опытных образцов или серии.

*Примечание.* Если требования по данному воздействию фактору предъявлены, то знак «+» означает, что испытания проводят; знак «–» – испытания не проводят; буква «Н» – испытания проводят, если это обусловлено спецификой и указано в стандартах и ТУ на изделия и ПИ.

---

(наименование предприятия-разработчика)

«УТВЕРЖДАЮ»

Руководитель организации,  
проводящей испытания

\_\_\_\_\_ (Ф.И.О)

«    »            20    г.

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПРИЕМОЧНЫХ  
ИСПЫТАНИЙ

---

(указывается полное наименование, тип, средства измерений)

ПМ

(обозначение документа)

на \_\_ листах

Начальник отдела-разработчика \_\_\_\_\_ (Ф.И.О)

«\_\_\_»            \_\_\_\_\_ 20    г.

Руководитель \_\_\_\_\_ (Ф.И.О)

«\_\_\_»            \_\_\_\_\_ 20    г.

20    год



## 1. ОБЪЕКТ ИСПЫТАНИЙ

1. На испытания предъявляются \_\_\_\_\_  
(кол-во образцов, наименование средств измерений)  
\_\_\_\_\_, принятые и опломбированные отделом  
технического контроля предприятия-изготовителя, а также комплект документации:
- техническое задание;
  - проект технических условий;
  - эксплуатационные документы (техническое описание, инструкция по эксплуатации, формуляр, паспорт, этикетка);
  - нормативно-технический документ по поверке;
  - карта технического уровня;
  - сборочный чертеж;
  - акт и протоколы предварительных испытаний;
  - расчет надежности (представляется по требованию заказчика);
  - проект описания типа;
  - акт экспертизы о возможности опубликования описания типа средств измерений в открытой печати;
  - фотография общего вида;
  - программа государственных приемочных испытаний или заключение метрологического института о возможности проведения испытаний по типовой программе.

## 2. ЦЕЛЬ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПРИЕМОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В процессе государственных приемочных испытаний должна быть проведена: оценка технического уровня средств измерений, проверка соответствия опытных образцов средств измерений требованиям ТЗ, проекту ТУ, конструкторской документации; экспериментальная проверка (апробация) операций проверки; проверка совместимости разработанного средства измерений с образцовыми средствами измерений, применяемыми при проверке, и установлена возможность постановки средств измерений на производство.

## 3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1. Государственные приемочные испытания \_\_\_\_\_  
(наименование средств измерений)  
\_\_\_\_\_ проводятся по утвержденной программе  
на соответствие ГОСТ, ТУ.

3.2. Государственные приемочные испытания проводятся на предприятии  
с « » \_\_\_\_\_ по « » \_\_\_\_\_ 20 г.

## 4. ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ

4.1. Рассмотрение технической документации:

4.1.1. Проверка соответствия комплектности представленной документации требованиям ГОСТ 8.001-80 и других НТД, регламентирующих требования к документации, а также требованиям ТЗ и ТУ проекта.

Проверяется соответствие документации требованиям ГОСТ 8.001-80, требованиям ТЗ.

#### 4.1.2. Проверка соответствия проекта ТУ требованиям ТЗ

Рассматривается проект ТУ на соответствие ТЗ. При наличии расхождения между требованиями ТЗ и техническими характеристиками, установленными в проекте ТУ, дается оценка технической целесообразности отступления от требований ТЗ.

#### 4.1.3. Оценка достаточности технико-экономического обоснования разработки

Рассматривается расчет технико-экономической эффективности от внедрения разработки.

#### 4.1.4. Проверка полноты, правильности и способов выражения метрологических характеристик, нормированных в технической документации, и их соответствие требованиям стандартов ГСИ – Государственной системы обеспечения единства измерений

Рассмотрение проекта ТУ на соответствие требованиям, установленным ТЗ.

#### 4.1.5. Проверка полноты и правильности методов контроля и испытаний

Рассмотрение проекта ТУ. Особое внимание обращается на методы определения нормированных метрологических характеристик, предусмотренных требованиями ТЗ.

#### 4.1.6. Оценка обеспеченности средствами проверки при серийном производстве, после ремонта и в эксплуатации. Оценка необходимости разработки новых образцовых средств измерений для обеспечения возможности проверки

Заключение дается на основании сопоставленных метрологических характеристик средств измерений и средств его поверки. При необходимости разработки средств поверки указывается предполагаемое предприятие-разработчик, сроки разработки, количество разрабатываемых образцов.

#### 4.1.7. Проверка комплектности, достаточности и качества ЗИП

Проверяется соответствие проекта ТУ ТЗ. Оценивается достаточность ЗИП.

#### 4.1.8. Проверка комплектности, достаточности, состава и качества математического обеспечения применяемых вычислительных средств

Оценивается обоснованность предъявляемых требований. Проверяется на соответствии проекта ТУ, ТЗ, оценивается достаточность математического обеспечения.

#### 4.1.9. Проверка обоснованности и достаточности требований к квалификации обслуживающего персонала

Оценивается обоснованность предъявляемых требований.

#### 4.1.10. Оценка достаточности принятых конструктивных решений и организационно-технических мероприятий по обеспечению безаварийности и безопасности работы

То же.

#### 4.1.11. Оценка достаточности, объема и периодичности технического обслуживания средств измерений, заданных в эксплуатационной документации

Рассматривается в связи с рекомендованным межпроверочным интервалом и параметрами надежности.

#### 4.1.12. Проверка уровня помехозащищенности средств измерений на соответствие требованиям ТЗ, ТУ.

4.1.13. Проверка правильности выбора и расчетов показателей надежности, методов и средств их контроля, а также межповерочных интервалов и соответствия их нормированным показателям надежности испытываемого средства измерений  
Проверку производят по документации на соответствие действующим стандартам.

4.1.14. Рассмотрение материалов предварительных испытаний  
Оценивается достаточность проведенных испытаний, соответствие результатов испытаний всем требованиям ТЗ и проекта ТУ. При необходимости разрабатываются мероприятия по устранению выявленных недостатков.

4.1.15. Рассмотрение карты технического уровня и качества. Оценка полноты сравнения с техническими характеристиками аналога  
Оценивается технический уровень разработок в сравнении с лучшими отечественными и зарубежными аналогами.

4.2. Экспериментальные исследования образцов  
Испытательная база и условия проведения испытаний определяются требованиями ТЗ, ТУ.

Номенклатура проверяемых параметров (объем испытаний) для конкретного средства измерения определяется требованиями ТЗ и проекта ТУ. При этом могут быть рекомендованы испытания, перечисленные в приведенной ниже форме.

Содержание испытаний	Пункт ТЗ	Пункт требований ТУ	Пункт методики ТУ	Образцовые, вспомогательные средства измерений, испытательное оборудование и их характеристики
1	2	3	4	5
4.2.1. Проверка соответствия средств измерения требованиям конструкторских документов и комплекта поставки 4.2.2. Проверка электрической прочности изоляции 4.2.3. Проверка сопротивления изоляции 4.2.5. Определение нормированных метрологических характеристик в нормальных условиях 4.2.5.1. Определение диапазонов измерений 4.2.5.2. Определение основной погрешности средства измерений (или отдельно систематической и случайной составляющих при их нормировании)				

1	2	3	4	5
<p>4.2.5.3. Определение чувствительности и дискретности</p> <p>4.2.5.4. Определение стабильности показаний за срок, регламентируемый в ТЗ, ТУ</p> <p>4.2.5.5. Определение динамических характеристик</p> <p>4.2.5.6. Проверка характеристик средств измерений в предельных рабочих условиях и условиях транспортирования</p> <p>4.2.6.1. Определение дополнительной погрешности, обусловленной изменением температуры, напряжения, частоты питания и других внешних влияющих факторов</p> <p>4.2.6.2. Испытания на устойчивость и прочность при климатических, механических воздействиях при эксплуатации и транспортировании</p> <p>4.2.6.3. Проверка устойчивости средств измерения к специальным воздействиям (коррозионностойкость, влагопроницаемость и т.д.)</p> <p>4.2.7. Определение входных и выходных сопротивлений, емкостей, индуктивностей (при наличии требований в ТЗ, ТУ)</p> <p>4.2.8. Определение времени одного измерения (при наличии требований в ТЗ, ТУ)</p> <p>4.2.9. Проверка времени установления рабочего режима и продолжительности непрерывной работы</p> <p>4.2.10. Проверка потребляемой мощности</p> <p>4.2.11. Проверка промышленных радиопомех, создаваемых испытуемым средством измерения при работе (при нормировании в ТУ)</p> <p>4.2.12. Проверка работы средства измерения при замене сменных элементов (при нормировании в ТУ)</p> <p>4.2.13. Проверка выполнения интерфейсных функций; проверка выходных сигналов, поступающих на внешнее устройство</p> <p>4.2.14. Проверка массы, габаритных размеров</p> <p>4.2.15. Проверка маркировки, упаковки на соответствие конструкторской документации</p>				

Окончание табл.

1	2	3	4	5
4.2.16. Оценка ремонтпригодности и возможности технического обслуживания 4.2.17. Проверка системы диагностирования и самодиагностирования (при наличии требований в ТЗ, ТУ) 4.2.18. Проверка функционирования опытного образца с применением программных средств (при нормировании в ТЗ, ТУ) 4.2.19. Оценка обоснованности рекомендаций по количеству и квалификации обслуживающего персонала 4.2.20. Оценка удобства транспортирования опытного образца и входящих в него составляющих частей				

Допускается применение других, не указанных в графе 5, средств измерения, обеспечивающих необходимые диапазоны, точности и условия применения.

## 5. УСЛОВИЯ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЯ

5.1. Подготовка средств измерения к испытаниям должна быть проведена в соответствии с требованиями проекта ТУ.

5.2. В процессе испытаний не разрешается проведение наладочных и настроечных работ, не предусмотренных эксплуатационной документацией.

5.3. Испытания по п. 4.2.5 проводятся при следующих нормальных условиях:

- температура окружающего воздуха;
- относительная влажность;
- атмосферное давление;
- вибрация;
- магнитное поле;
- напряжение питания и др.

## 6. ОФОРМЛЕНИЕ И ОТЧЕТНОСТЬ

6.1. Результаты рассмотрения технической документации по п. 4.1 и экспериментальной проверки образцов по п. 4.2 оформляют протоколами с указанием полученных в результате испытаний численных значений. Протоколы подписываются сотрудниками, проводящими испытания.

6.2. По результатам испытаний составляется акт по форме приложений ГОСТ 8.001-80.

**Сводная ведомость отказов, возникших при испытаниях**

Сводная ведомость отказов, возникших при испытаниях \_\_\_\_\_  
(число)

изделий \_\_\_\_\_,  
(наименование)

изготовленных \_\_\_\_\_  
(наименование предприятия-изготовителя)

Заводской номер изделия \_\_\_\_\_

Дата начала испытаний \_\_\_\_\_

Дата выпуска изделия \_\_\_\_\_

Дата конца испытаний \_\_\_\_\_

(год, месяц)

Группа изделия \_\_\_\_\_  
(по ГОСТ 12997-76, (СТ СЭВ 1635-79), ГОСТ 16019-78, ГОСТ 22261-76)

1	2	3	4	5	Классификация отказов		Время, затраченное на		10
					6	7	8	9	
Наработка изделия с начала испытаний до отказа, ч.	Вид действующего фактора	Цикл испытаний	Наименование отказавшего узла, блока, ячейки	Причина отказа	по характеру изменения отказа	по причине возникновения	обнаружение отказа, мин.	устранение отказа, мин.	Организационно-технические мероприятия

**Интенсивности отказов изделий электронной техники  
и электрических соединений в электроустановках РЭС**

Наименование изделий и типов соединений	Интенсивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$ , 1/ч
Микросхемы в пластмассовом корпусе	0,1
Микросхемы в керамическом корпусе	0,01
Маломощные транзисторы	0,05
Мощные транзисторы	0,5
Маломощные диоды	0,02
Мощные диоды	0,2
Углеродистые резисторы	0,01
Проволочные резисторы	0,5
Регулируемые резисторы	2
Конденсаторы танталовые	0,02
Конденсаторы электролитические	0,2
Кристалл кварца	0,05
Переключатели	0,2
Реле	0,5
Трансформаторы	0,5
Пайка ручным способом	0,2
Пайка автоматическим способом	0,002
Разъемный контакт	0,05
Соединение «под винт»	0,08
Соединение накруткой	0,0012
Соединение сваркой	0,0006
Соединение обжимкой	0,006

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бегларян, В.Х. Климатические испытания аппаратуры и средств измерений / В.Х. Бегларян. – М.: Машиностроение, 1983.
2. Бутин, В.И. Система радиационных испытаний электронной техники / В.И. Бутин, В.Ф. Зинченко, А.А. Романенко. – Владимир, 2003.
3. Большаков, И.Г. Техническая эстетика и качество продукции / И.Г. Большаков, Ю.С. Сомов. – М.: Стандарты и качество. 1969.
4. Борисов, В.И. Общая методология конструирования машин / В.И. Борисов. – М.: Машиностроение, 1978.
5. Ботавин, В.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур / В.В. Ботавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович. – М.: Радио и связь, 1985.
6. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: справочник / В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение. 1991.
7. Вальд, А. Последовательный анализ: пер. с англ. / А. Вальд. – М.: Физматгиз, 1961.
8. Глудкин, О.П. Электрические методы исследования дефектности тонких диэлектрических слоев: обзоры по электронной технике. Сер. 2: Полупроводниковые приборы / О.П. Глудкин. – Вып. 2 (935). – М.: Электроника, 1983.
9. Глудкин, О.П. Устройства и методы фотометрического контроля в технологии производства ИС / О.П. Глудкин, А.Е. Густов. – М.: Радио и связь, 1981.
10. Глудкин, О.П. Технология испытания микроэлементов радиоэлектронной аппаратуры и интегральных микросхем / О.П. Глудкин, В.Н. Черняев. – М.: Энергия, 1980.
11. Глудкин, О.П. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА / О.П. Глудкин, В.Н. Черняев. – М.: Радио и связь, 1983.
12. Гольдин, В.А. Установки и аппараты радиоэлектронной технологии / В.А. Гольдин, Е.Д. Чистов. – М.: Энергоиздат, 1985.
13. ГОСТ 27-002–83. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Госкомитет по стандартам. 1983.
14. Государственная приемка продукции в машиностроении / под ред. В.П. Бурмистрова. – Л.: Машиностроение, 1987.
15. Жутовский, В.Л. Испытания средств измерений. Организация и порядок проведения: справ. пособие / В.Л. Жутовский. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
16. Испытательная техника / под ред. В.В. Клюева. Кн. 1, 2. – М.: Машиностроение, 1982.
17. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под ред А.И. Коробова. – М.: Радио и связь, 1987.
18. Комраков, Б.М. Измерение параметров оптических покрытий / Б.М. Комраков, Б.А. Шапочкин. – М.: Машиностроение, 1986.
19. Конструктивно-технологическое проектирование электронной аппаратуры / под ред. проф. В.А. Шахнова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
20. Коледов, Л.А. Технология и конструкции микросхем микропроцессоров и микросборок / Л.А. Коледов. – М.: Радио и связь, 1989.
21. Кузнецов, В.А. Основы метрологии / В.А. Кузнецов, Г.В. Ялунина. – М.: ИПК изд-ва стандартов, 1995.
22. Константинов, В.Д. Основы теории надежности авиационной техники / В.Д. Константинов. – М.: МИИГА, 1992.
23. Костиков, В.И. Принципы прогнозирования качества промышленной продукции // Вопросы управления качеством в машиностроении и приборостроении / Костиков В.И. – М.: МДНТП, 1973.
24. К вопросу эстетической оценки промышленных изделий. – М.: МДНТП, 1996.
25. Мартынов, В.В. Литографические процессы / В.В. Мартынов, Т.Е. Базарова. – М.: Высш. шк., 1990.



26. Методические указания по оценке эстетических показателей качества промышленной продукции. – М.: ВНИИТЭ, 1975.
27. Миллер, Ю.Г. Методы и средства контроля электрических параметров интегральных микросхем / Ю.Г. Миллер, И.Ф. Пучков. – М.: Машиностроение, 1979.
28. Митрейкин, Н.А. Надежность и испытания радиодеталей и радиокомпонентов / Н.А. Митрейкин, Д.И. Озерский. – М.: Радио и связь, 1981.
29. Оптические методы контроля интегральных микросхем / под ред. Л.Г. Дубицкого. – М.: Радио и связь, 1982.
30. Павлов, Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. – М.: Высш. шк., 1987.
31. Петербургский журнал электроники. – СПб.: ОАО РНИИ «Электронстандарт». – 1. – 2003.
32. Приборы для неразрушающего контроля изделий: справочник. Т.а 1,2 / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986.
33. РД-50-84. Методические указания. Надежность в технике. Интервальные оценки надежности технического объекта по результатам испытаний составных частей. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
34. Шторм, Регина. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества: пер. с нем. / Регина Шторм. – М.: Мир, 1970.
35. Румянцев, С.В. Радиационные методы неразрушающего контроля: справочник / С.В. Румянцев, А.С. Штань, В.А. Гольцов. – М.: Энергоиздат, 1982.
36. Семенов, Ю.Г. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. Кн. 10: Контроль качества / Ю.Г. Семенов. – М.: Высш. шк., 1990.
37. Сергеев, А.Г. Метрология / А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. – М.: Логос, 2001.
38. Сергеев, Н.П. Метрология в радиоэлектронике / Н.П. Сергеев. – М.: МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского. Ч. 1, 1997. Ч. 2, 1999.
39. Синдеев, И.Д. К вопросу синтеза логических схем для поиска неисправности и контроля состояний сложных систем // Известия ОНТ / И.Д. Синдеев. – М.: Техническая кибернетика. – № 2. – 1963.
40. Системы управления качеством. – М.: Стандарты, 1970.
41. Надежность технических систем: справочник / под ред. проф. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985.
42. Метрологическое обеспечение управления качеством изделий электронной техники // Электронная техника. Сер. «Управление качеством и стандартизация» / В.Н. Сretenский [и др.]. – Вып. 1(96). – М., 1973.
43. Смирнов, Н.А. Современные методы анализа и контроля продуктов производства / Н.А. Смирнов. – М.: Металлургия, 1985.
44. Тартаковский, Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М.: Высш. шк., 2001.
45. Тульчин, Л.Г. Оценка качества электроизмерительных приборов / Л.Г. Тульчин, А.М. Хаскин, В.Д. Шаповалов. – Л.: Энергоиздат, 1982.
46. Федоров, М.В. О комплексной оценке качества промышленных изделий // Техническая эстетика / М.В. Федоров. – М. – № 3. – 1973.
47. Федоров, В. К. Художественное конструирование технологического оборудования в электронном машиностроении / В. К. Федоров. – М.: Энергия, 1975.
48. Файгенбаум, А. Контроль качества продукции: пер. с англ. / А. Файгенбаум. – М., 1986.
49. Ханке, Х.И. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры: пер. с нем. / Х.И. Ханке, Х. Фабиан. – М.: Энергия, 1980.
50. Шор, Я.Б. Таблицы для анализа и контроля надежности / Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин. – М.: Советское радио, 1968.

## СОДЕРЖАНИЕ

Лекционные занятия

### Глава 1. Проблемы контроля качества в проектировании и производстве радиоэлектронных средств

- 1.1. Показатели качества РЭС, способы их оценки и классификация
- 1.2. Классификация радиоэлектронных средств
- 1.2. Классификация радиоэлектронных средств
- 1.3. Факторы, влияющие на работоспособность РЭС
- 1.4. Общие технические требования к радиоэлектронным средствам
- 1.5. Методы стандартизации в решении проблем обеспечения качества РЭС
- 1.6. Основные теор-е принципы построения с-м упр-я кач-м РЭС
- 1.7. Основные принципы практич. построения с-м упр-я качеством РЭС

### Глава 2.

- 2.1. Цели и задачи испытаний РЭС
- 2.2. Классификация видов, методов и технологии испытаний
- 2.3. Общие принципы проведения испытаний РЭС
- 2.4. Планирование испытаний
- 2.5. Выбор объектов испытаний
- 2.6. Основные разделы программы испытаний
- 2.7. Взаимосвязь программ испытаний
- 2.8. Общие принципы построения и содержания методики испыт-й

### Глава 3

- 3.1. Особенности методики испытаний
- 3.2. Испытания на температурные воздействия
- 3.3. Испытания на воздействие инея и росы
- 3.4. Испытания на воздействие повышенной влажности
- 3.5. Испытания на воздействие солнечного излучения
- 3.6. Испытания на воздействие пыли
- 3.7. Испытания на воздействие атмосферного давления
- 3.8. Испытания на воздействие повышенного гидростатического давления
- 3.9. Испытания на воздействие соляного тумана
- 3.10. Испытания на внешнее воздействие воды
- 3.11. Испытания на ветроустойчивость
- 3.12. Испытания на герметичность
- 3.13. Испытания на биологические воздействия
- 3.14. Специальные виды космических испытаний

### Глава 4

- 4.1. Общая структура и методические принципы проведения испытаний
- 4.2. Испытания на определение резонансных частот конструкции
- 4.3. Испытания на наличие резонансных частот конструкции в заданном диапазоне частот
- 4.4. Испытания на виброустойчивость и вибропрочность
- 4.5. Испытания на ударную прочность
- 4.6. Испытания на воздействие линейного ускорения
- 4.7. Испытания на воздействие акустического шума

### Глава 5

- 5.1. Виды ионизирующих излучений, воздействующих на РЭС
- 5.2. Радиационная стойкость
- 5.3. Особенности воздействия ИИ на материалы и элементы РЭС
- 5.4. Методика проведения радиационных испытаний

### Глава 6

- 6.1. Основные понятия и определения технической диагностики
- 6.2. Оценка состояний РЭС методами теории информации

- 6.3. Оценка состояний РЭС методами математической логики
- 6.4. Оценка состояния РЭС методами интегральной диагностики
- 6.5. Методы поиска отказов в РЭС

#### Глава 7

- 7.1. Основные термины и определения
- 7.2. Показатели надежности
- 7.3. Специальные показатели надежности РЭС
- 7.4. Оценка надежности РЭС вероятностными методами
- 7.5. Способы повышения надежности РЭС
- 7.6. Надежность системы с резервированием замещением
- 7.7. Методы определения точечных и интервальных оценок показателей надежности
- 7.8. Интервальные методы оценки показателей надежности

#### Глава 8

- 8.1. Особенности организации испытаний РЭС на надежность
- 8.2. Использование системы контроля качества для достижения высокой надежности РЭС
- 8.3. Ускоренные испытания РЭС на надежность
- 8.4. Краткая характеристика надежности элементов РЭС
- 8.5. Условия проведения форсированных испытаний на надежность
- 8.6. Контроль показателей надежности при заданных планах испытаний
- 8.7. Метод последовательных испытаний РЭС на надежность

#### Глава 9

- 9.1. Классификация методов контроля качества РЭС
- 9.2. Методы не разрушающего контроля РЭС
  - 9.2.1. Акустические методы
  - 9.2.2. Капиллярные методы
  - 9.2.3. Электрохимические методы
  - 9.2.4. Оптический контроль
  - 9.2.5. Электрические методы

#### Глава 10

- 10.1. Основные принципы и определения
- 10.2. Статистический контроль по качественным показателям
- 10.3. Статистический контроль по количественным показателям
- 10.4. Табличный метод оценки достоверности статистических данных
- 10.5. Вероятностное описание результатов статистического контроля
- 10.6. Требования к оценкам контролируемых величин
- 10.7. Законы распределения случайных величин
- 10.8. Экспериментальное определение закона распределения
- 10.9. Идентификация закона распределения

#### Глава 12

- 12.1. Точечные и интервальные оценки контролируемых величин. Точечные оценки
- 12.2. Определение объема выборки
- 12.3. Контроль технологических процессов с помощью среднего значения выборки
- 12.4. Статистическое регулирование качества технологических процессов
- 12.5. Оценка состояния технологических процессов с помощью контрольных карт
- 12.6. Контроль процесса фотолитографии в производстве ГПИС

#### Практические занятия

#### Лабораторные занятия

#### Литература

*Учебное издание*

Алексеева Татьяна Анатольевна

**ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ И СЕРТИФИКАЦИЯ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Учебно-методический комплекс  
для студентов радиотехнического факультета специальности  
1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование»

Редактор *Т.В. Булах*

Дизайн обложки *В.А. Виноградовой*

---

Подписано в печать 16.02.2010. Формат 60×84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 21,11. Уч.-изд. л. 20,5. Тираж 90 экз. Заказ 260.

---

Издатель и полиграфическое исполнение –  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.2009 ЛП № 02330/0494256 от 27.05.2009

211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29