

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

В.А. Медников

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ РЭС

Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 210201 "Проектирование и технология радиоэлектронных средств" направления 210200 "Проектирование и технология электронных средств".

САМАРА
Издательство СГАУ
2009

УДК СГАУ: 621.38(075)

ББК 32

М 424

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. Г.В. П е т р о в а,
канд. техн. наук А.В. Б е л о в

Медников В.А.

М424 Методы и средства испытаний РЭС: учеб. пособие / *В. А. Медников.* - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. - 76с.

ISBN 978-5-7883-0757-2

Рассмотрены место и роль испытаний в Единой системе управления качества радиоэлектронных средств, эксплуатационные факторы, влияющие на функционирование радиоэлектронной аппаратуры, экономические и статистические аспекты планирования испытаний, испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность; даны рекомендации по методике планирования испытаний, приведены примеры расчета параметров выборочных испытаний.

Предназначено для студентов специальности 210201 (220500) «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» дневной, очно - заочной и заочной форм обучения. Разработано на кафедре «Электронные системы и устройства».

УДК СГАУ: 621.38(075)

ББК 32

Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

ISBN 978-5-7883-0757-2

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕСТО И РОЛЬ ИСПЫТАНИЙ В ЕДИНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РЭС.....	5
2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЭС.....	10
2.1. Факторы, определяющие качество РЭС	10
2.2. Воздействие эксплуатационных факторов на свойства РЭС	15
3. СИСТЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ РЭС	23
4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ИСПЫТАНИЙ	27
5. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ РЭС.....	45
5.1. Классификация методов испытаний.....	45
5.2. Общая методология испытаний	50
6 ИСПЫТАНИЯ РЭС НА НАДЕЖНОСТЬ.....	55
6.1. Показатели надежности.....	55
6.2. Выбор нагрузки при испытаниях.....	61
6.3. Испытания на повреждающую нагрузку.....	61
6.4. Испытание РЭС на длительность хранения (сохраняемость).....	62
6.5. Прогнозирование надежности РЭС	64
6.6. Статистическая оценка законов распределения численных показателей надежности.....	66
6.7. Ускоренные испытания РЭС	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	73
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	74

Радиоэлектронные средства (РЭС) находят самое широкое применение в различных областях науки и техники. Задачи, возлагаемые на РЭС, зачастую очень ответственные, что обуславливает высокие требования к их надежности. В то же время условия эксплуатации РЭС весьма разнообразные, а в большинстве случаев очень тяжелые. Это затрудняет выполнение требований высокой надежности. Рассмотрим, например, автомат современного воздушного лайнера. Его основу составляют РЭС, которые воспринимают информацию системы датчиков, перерабатывают ее и выдают сигналы на исполнительные устройства. Условия эксплуатации таких РЭС достаточно тяжелые, т. к. на них действуют изменения температур в широком диапазоне, перепады атмосферного давления и влажности, удары, вибрация, интенсивный акустический шум и другие факторы. Несмотря на это, РЭС должны функционировать с высокой надежностью, т. к. их отказ может стоить десятки человеческих жизней.

Об уровне надежности судят по способности РЭС безотказно функционировать в течение заданного времени при определенных условиях эксплуатации. Для определения этой способности осуществляются испытания РЭС в условиях, близких к эксплуатационным, а для поддержания этой способности осуществляется технический контроль в процессе производства [1, 2].

Правильно организованные испытания и контроль РЭС позволяют не только оценить их надежность и степень соответствия предъявляемым требованиям, но и способствуют значительному повышению надежности. Одним из путей решения этой задачи является действенный контроль и управление качеством выпускаемых РЭС на всех этапах их создания. В системе управления качеством испытаниям отводится немаловажное место, т. к. испытаниями заканчивается работа по изготовлению РЭС. Только по результатам испытаний можно судить, насколько работа была плодотворной и успешной.

Правильность выбора метода испытаний, точность поддержания заданных режимов, метрологическая чистота оценки результатов испытаний — важнейшие условия, обеспечивающие объективную оценку качества испытываемых РЭС и эффективность управления качеством их выпуска. В оценке испытываемых РЭС не должно быть ошибки. Ошибочное признание РЭС, удовлетворяющих заданным требованиям по результатам испытаний, чревато катастрофическими последствиями в процессе эксплуатации таких РЭС. Ошибочное признание хороших РЭС по результатам испытаний как не удовлетворяющих заданным требованиям может сделать бесполезной работу больших коллективов по созданию и изготовлению РЭС, а также привести к большим экономическим потерям.

1. МЕСТО И РОЛЬ ИСПЫТАНИЙ В ЕДИНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Перед разработчиками современных РЭС стоит задача создания высококачественной аппаратуры, соответствующей по своим характеристикам уровню лучших мировых стандартов и образцов. Согласно ГОСТ 15467 — 79 *качество РЭС* — это совокупность свойств РЭС, обуславливающих их пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением. В последнее время вопрос повышения качества РЭС, и в частности их надежности, превратился в серьезную проблему. Можно выделить три основные причины, породившие эту проблему:

1) значительное усложнение РЭС, применение в них огромного количества элементов, что, как известно из теории надежности, снижает надежность аппаратуры с увеличением числа элементов;

2) использование РЭС в самых различных областях науки, техники и народного хозяйства. Часто задачи, возлагаемые на РЭС, связаны с обеспечением безопасности человеческих жизней. Перед такими РЭС стоит задача обеспечения «абсолютной» надежности;

3) работа РЭС в тяжелых условиях эксплуатации, например, при резких перепадах температуры и атмосферного давления, при больших механических нагрузках и т. д.

Для решения этой проблемы при разработке и изготовлении РЭС высокого качества и надежности создана система управления качеством.

Управление качеством РЭС — это действия, осуществляемые при разработке и изготовлении РЭС, в целях установления и поддержания необходимого уровня качества РЭС.

Контроль качества — это проверка соответствия показателей качества РЭС установленным требованиям. Качество $K_{РЭС}$ изготавливаемых РЭС будет высоким, если высоки качество K_m модели РЭС и качество K_n изготовления РЭС:

$$K_{РЭС} = K_m \& K_n. \quad (1)$$

В данном случае под моделью понимается о вещественный прототип РЭС, предназначенный для последующего изготовления, т. е. разработанный и испытанный промышленный образец. Качество модели K_m зависит от качества $K_{др}$ нормативной документации на разработку РЭС, качества $K_{тр}$ труда лиц, разрабатывающих РЭС, качества $K_{тр}$ технических средств, необходимых для разработки РЭС (оборудование и оснащение лабораторий испытательных станций, стендов и т. д.):

$$K_m = K_{др} \& K_{тр} \& K_{тр}. \quad (2)$$

Качество $K_{и}$ изготовления РЭС тоже определяется рядом составляющих, и в первую очередь качеством $K_{ди}$ нормативной документации на изготовление РЭС, качеством оборудования и инструмента $K_{он}$, качеством сырья, материалов и комплектующих изделий $K_{смк}$, качеством труда изготовителей $K_{три}$ и т. д.:

$$K_{и} = K_{ди} \& K_{он} \& K_{смк} \& K_{три}. \quad (3)$$

Таким образом, для решения проблемы качества РЭС разработана система управления качеством, включающая систематический контроль качества, т. е. контроль за соответствием показателей качества РЭС установленным требованиям, который осуществляется путем проведения соответствующих испытаний. Следовательно, без испытаний РЭС невозможен контроль качества, а без контроля — соответственно действенное управление качеством.

Система управления качеством базируется на комплексной службе контроля качества, возглавляемой главным контролером, наделенным правами заместителя директора предприятия по качеству, и состоящей, как правило, из следующих отделов: надежности и управления качеством; испытаний; метрологии; технического контроля [3]. Одним из основных отделов в этой системе является отдел технического контроля (ОТК), осуществляющий определение соответствия качественных и количественных характеристик контролируемых изделий, процессов требованиям ГОСТов, нормалей, ТУ, инструкций и чертежей. На рис.1 приведена структурная схема стадий разработки РЭС, включающих операции контроля и испытаний, анализа полученных результатов и выработку управляющих воздействий [2, 4].

Как видно, все стадии создания и эксплуатации РЭС сопровождаются контролем, виды которого весьма разнообразны. Их можно классифицировать по следующим классификационным признакам [1, 2, 3, 4]:

по годности изделия после контроля — на разрушающие и неразрушающие виды контроля;

по стадиям производственного процесса — на входной, текущий, приемочный;

по степени участия человека — на ручной, полуавтоматический, автоматический.

Основные виды технического контроля, цели, условия использования приведены в табл. 1.

При выборе средств контроля учитывают обычно следующие основные факторы:

- 1) тип производства (единичное, серийное, массовое);
- 2) назначение контролируемых РЭС и степень их сложности;
- 3) место проведения контроля (конвейер, лаборатория, место эксплуатации);

- 4) требуемая надежность средств контроля;
- 5) быстродействие средств контроля;
- 6) допустимая погрешность контроля;
- 7) квалификация контролеров и безопасность их работы.

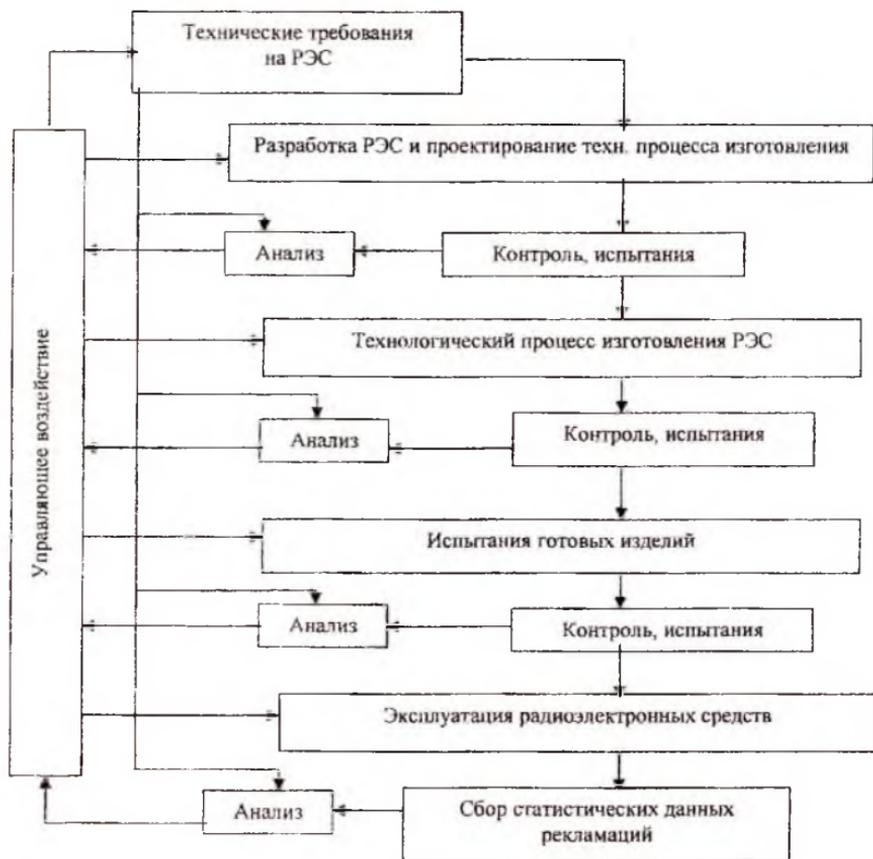


Рис. 1. Структурная схема контроля и испытаний в жизненном цикле РЭС

Важную роль при выборе средств контроля играют экономические вопросы, связанные со стоимостью контроля. На рис. 2 приведен график зависимости стоимости контроля от количества контролируемых операций для трех основных типов контрольной аппаратуры.

На предприятии ОТК подчинен организационно ряд подразделений, участвующих в проведении контроля. Так, лабораторией входного контроля (ЛВК) осуществляется входной контроль материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий, поступающих на предприятие. Бюро технического контроля

цеха (БТК) контролирует правильность выполнения технологических процессов, проводит окончательную техническую приемку с оценкой качества и комплектности изделий.

Таблица 1. Классификация видов технического контроля

Признак классификации	Вид технического контроля	Цель, условия использования
Способ контроля	Визуальный	Выявление поверхностных дефектов, правильность монтажа пайки, состояние изоляции.
	Геометрический Механический Электрический	Проверка на соответствие форм чертежам. Проверка прочности соединений, креплений. Проверка параметров РЭС, напряжений, сопротивлений, прочности изоляции. Проверка свойств материалов.
	Физико - химический Технологический	Проверка правильности технологических операций
Признак классификации	Вид технического контроля	Цель, условия использования
Отношение к производственному процессу	Входной Текущий	Проверка комплектующих изделий. Выявление брака и обнаружение причин брака, оценка правильности настройки оборудования.
	Приемочный (выходной)	Проверка окончательно собранной РЭС
Способ определения степени пригодности изделия	По качественному признаку	Определение численного значения параметров РЭС, выявление закона распределения параметров.
	По количественному признаку	Определение степени годности РЭС, соответствие их параметров допустимым
Степень охвата	Стопроцентный Выборочный	При освоении производства. Применяется при стабильном массовом или серийном производстве.
	Промежуточный Операционный	Применяется после сложных операций. Применяется на рабочем месте
Характер воздействия на ход производственного процесса	Пассивный	Применяется для отделения брака от годной продукции.
	Активный	Применяется для обнаружения брака, анализа причин по количественному признаку
Периодичность	Непрерывный Периодический	Контролируются систематически все изделия. Контролируется часть РЭС через определенное время.
	Инспекторский	Применяется при резком увеличении брака или обнаружении нарушений технологии
Степень участия человека в процессе контроля	Ручной	Применяется при мелкосерийном производстве
	Полуавтоматический Автоматический	Применяется при серийном производстве. Установку РЭС осуществляет контролер
		Применяется при массовом производстве
Характер воздействия на РЭС	Неразрушающий	Применяется для оценки качества готовой продукции.
	Разрушающий	Применяется для выявления скрытых дефектов при анализе брака

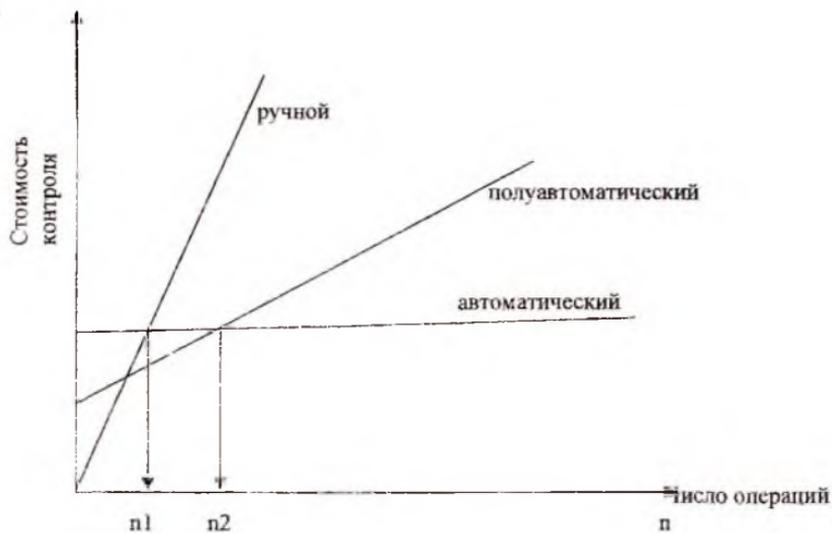


Рис. 2. Зависимость стоимости контроля от количества операции

Лаборатория анализа проводит анализ брака, выявляет причины появления дефектов. Лаборатория окончательных испытаний проводит испытания и контроль готовой РЭС, а также материалов и узлов, входящих в конструкцию изделия. Контрольно-измерительной лабораторией (КИЛ) осуществляется проверка измерительных приборов, линейных и угловых мер, а также контроль разработанных предприятием инструментов и оснастки. Техническим бюро (ТБЦ) проводится анализ данных эксплуатации и рекламаций, обобщаются все материалы по результатам контроля качества на предприятии, составляется вся отчетная техническая документация, которой обеспечивается и БТК.

Вторым по значимости в системе управления качеством после ОТК является отдел испытаний, в котором РЭС подвергаются реальным или экстремальным условиям эксплуатации, которые воспроизводятся (имитируются) на специальных установках и стендах с целью выявления потенциально ненадежных элементов изделия.

2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЭС

2.1. Факторы, определяющие качество РЭС

На различных этапах создания и изготовления РЭС на их качество и надежность влияют различные факторы [1, 3]. Их можно условно разделить на объективные и субъективные, внешние и внутренние, естественные и искусственные.

К *субъективным* относятся факторы, связанные с участием человека в процессах проектирования и изготовления РЭС.

Объективные факторы — это такие факторы, которые не зависят от человека и определяются условиями разработки, изготовления и эксплуатации РЭС.

Внешние факторы — такие, которые влияют на качество РЭС независимо от режимов работы.

Внутренними факторами называются такие, которые влияют на качество РЭС в зависимости от режимов работы и входящих в них элементов.

К *естественным* относятся факторы, которые определяются естественными условиями окружающей среды, в которой функционируют РЭС.

К *искусственным факторам* относятся такие, которые определяются условиями внешней среды, создаваемой человеком.

Все факторы по-разному сказываются на различных этапах создания РЭС и их эксплуатации. На этапах разработки основное влияние на качество РЭС оказывают субъективные факторы. К ним можно отнести в основном квалификацию людей, занятых непосредственно разработкой РЭС, допускаемые ими ошибки.

На этапах производства значительное влияние на качество РЭС оказывают как субъективные, так и объективные факторы. К субъективным факторам в этом случае можно отнести квалификацию людей, занятых производством РЭС, состояние технологической дисциплины, допускаемые отклонения от нее. К объективным факторам в процессе производства относятся: состояние технологического оборудования и инструмента, исходных материалов и элементов, из которых изготавливаются РЭС, условия окружающей среды, в которой производятся РЭС.

На этапах эксплуатации основное влияние на качество РЭС оказывают объективные эксплуатационные факторы. Субъективные факторы имеют место только при обслуживании РЭС. К ним относятся квалификация операторов, ра-

ботающих с аппаратурой, и допускаемые ими ошибки. Наибольшую группу составляют объективные, эксплуатационные факторы.

Все факторы можно разделить на пять групп: механические, климатические, биологические, космические, радиационные.

К *механическим факторам* относятся:

вибрационные нагрузки, они делятся на двадцать степеней жесткости и лежат в диапазоне частот 1...5000 Гц. Максимальное ускорение при вибрационных нагрузках достигает 40 g;

ударные нагрузки: многократные удары при максимальном ускорении до 150 g и длительности ударного импульса от 1 до 15 мс делятся на четыре степени жесткости; одиночные удары при максимальном ускорении до 300 g и длительности ударного импульса от 0,2 до 60 мс делятся на восемь степеней жесткости;

линейные (центробежные) нагрузки с ускорением до 500 g делятся на семь степеней жесткости.

Диапазоны воздействующих механических факторов для каждой степени жесткости приведены в ГОСТ 16962—71. К этой группе факторов можно отнести также акустический шум (звуковое давление) в диапазоне частот 5...1000 Гц при акустическом давлении до 180 дБ, тряску и взрывную волну.

К группе *климатических факторов* относятся:

температура воздуха или другого газа при эксплуатации до 500 °С (верхнее значение) делится на пятнадцать степеней жесткости. Нижнее значение (минус 85 °С) делится на девять степеней жесткости;

циклическое изменение температуры;

температурный удар;

пониженное атмосферное давление до 10^{-6} мм рт. ст.;

повышенное атмосферное давление до 3 атм делится на две степени жесткости;

влажность воздуха до 100 % при 35 °С и более низких температурах с конденсацией влаги делится на восемь степеней жесткости;

дождь с интенсивностью до 5 мм/мин;

иней с последующим его оттаиванием и образованием росы;

капли, падающие под углом от 90 до 45° к горизонтали, с интенсивностью 0,4 мм/мин;

гидростатическое давление;

пыль, песок и промышленные газы;

соляной (морской) туман;

солнечная радиация с верхними значениями интегральной плотности теплового потока 1125 Вт/м^2 , в том числе плотности потока ультрафиолетовой части спектра 42 Вт/м^2 .

К биологическим факторам относятся:

плесневые грибки; бактерии; насекомые; грызуны, млекопитающие.

К космическим факторам относятся:

невесомость, космическая радиация, соударения с микрометеороидами.

К радиационным факторам относятся:

облучения различного рода источниками естественного и искусственного радиоактивного воздействия, ядерными взрывами.

Действие того или иного фактора на работоспособность РЭС определяется климатической зоной или климатическими условиями. Климатической зоной называют участок поверхности Земли, на котором в течение 30—50 лет наблюдаются постоянные, характерные метеорологические условия. Наиболее важными факторами являются тепловой и водный баланс Земли, который зависит от следующих климатообразующих факторов: радиационный режим, циркуляция атмосферы, влагооборот, местные особенности.

Радиационный режим определяется прямой Q_r и рассеянной q_r солнечной радиацией [5], эффективностью излучения земли E_r (разность потока от поверхности земли к атмосфере и потока от атмосферы к земле), а также отношением отраженной энергии к падающей α_r . Радиационный баланс

$$R_r = (Q_r + q_r) \cdot (1 - \alpha_r) - E_r. \quad (4)$$

В зависимости от соотношения климатообразующих факторов различают следующие климатические зоны: умеренную, холодную, тропическую влажную, тропическую сухую, влажную субтропическую и высокогорную.

В зоне умеренного климата среднегодовое изменение температуры составляет $30 \dots 35 \text{ }^\circ\text{C}$ с максимальными изменениями $40 \text{ }^\circ\text{C}$; среднесуточный перепад температур $11 \text{ }^\circ\text{C}$; средняя относительная влажность 80% при $20 \text{ }^\circ\text{C}$; обледенение, образование инея, росы, наличие тумана; изменение давления воздуха от 700 до 800 мм рт. ст. Нормальными климатическими условиями являются [4] температура $+20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$; атмосферное давление $700 \dots 780$ мм рт. ст.; влажность воздуха $45 \dots 80 \%$.

Для зоны холодного климата характерно наличие отрицательных температур в течение большей части года с изменениями в среднем от минус $50 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+30 \text{ }^\circ\text{C}$ и перепадами: годовым до $80 \text{ }^\circ\text{C}$, среднесуточным до $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Для зоны сухого тропического климата характерны высокая температура и низкая относительная влажность воздуха ($10 \dots 20\%$). Температура воздуха может изменять-

ся от +60°C до минус 10°C (ночью), суточные изменения температуры 40°C. Основные характеристики умеренного, холодного и тропического климатов приведены в табл. 2.

Характеристики окружающей РЭС атмосферы зависят не только от вида климатической зоны, но и от высоты над уровнем моря. Атмосферу в соответствии с климатическими изменениями разделяют на следующие зоны: тропосфера (до 16 км); стратосфера (от 16 до 40 км); мезосфера (от 40 до 80 км); ионосфера (свыше 80 км). Давление воздуха с увеличением высоты уменьшается, а температура сначала уменьшается, а затем возрастает.

Таким образом, рассмотренные эксплуатационные объективные факторы воздействия на аппаратуру можно классифицировать с помощью структурной схемы, приведенной на рис. 3.

Таблица 2. Характеристика естественных климатических условий эксплуатации РЭС

Климат	Умеренный	Холодный	Тропический
Температура, °C	40 - 40	40 - 60	45 - 10
Относительная влажность, % при температуре, °C	100 25	100 25	100 35
Интегральная плотность потока солнечной радиации, Вт/м ²	1125	1125	1125
Колебания температуры за 8 ч, °C	40	40	40
Максимальная интенсивность дождя, мм/мин	3	3	5
Динамическое воздействие пыли, песка	-	-	+
Иней	+	+	-
Плесневые грибы	-	-	+
Морская соль в воздухе, мг/м ³ сутки	2	2	2

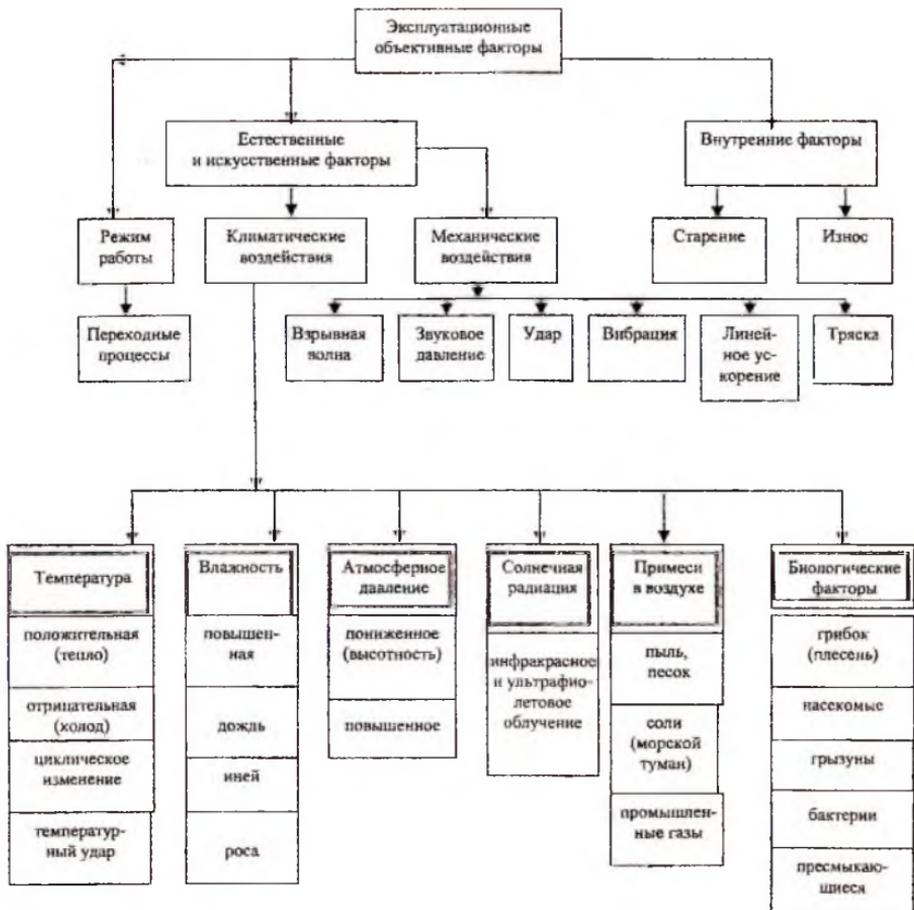


Рис. 3. Классификация факторов, воздействующих на РЭС

Из всех объективных эксплуатационных факторов наибольшее воздействие на надежность РЭС оказывают климатические факторы. Влияние каждого климатического фактора в отдельности и в сочетании с другими схематично можно представить в виде рис. 4. Эксплуатационные условия, в которых эксплуатируются или хранятся РЭС, зависят не только от климатической зоны Земли, но и способа размещения аппаратуры на объектах или носителях.

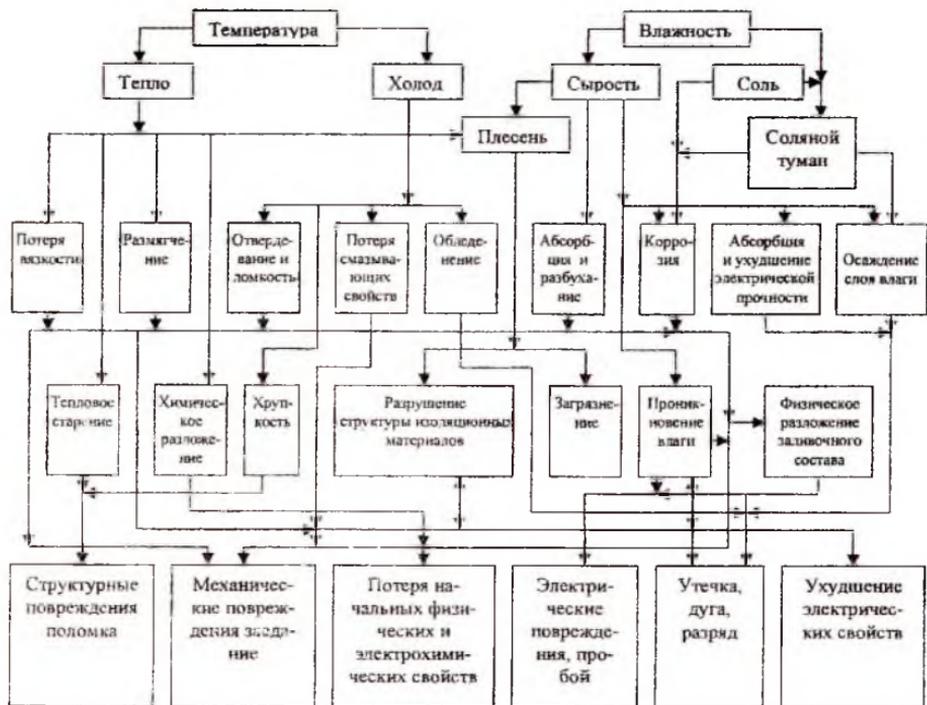


Рис. 4. Схема влияния климатических факторов на эксплуатационные характеристики РЭС

Различают следующие способы размещения РЭС на объектах: на открытом воздухе; под навесом; в помещениях без искусственного регулирования климатических условий; в помещениях с искусственным регулированием климатических условий; в гермоотсеках. Выбор того или иного способа установки изделий РЭС определяется плотностью компоновки, наличием местной или общей герметизации, влиянием тепловыделения других элементов.

2.2. Воздействие эксплуатационных факторов на свойства РЭС

2.2.1. Влияние климатических факторов

Наиболее существенное влияние на характеристики и параметры РЭС оказывает температура аппаратуры, которая, в свою очередь, зависит от окружающей среды и интенсивности солнечной радиации. Температура окружающей среды может колебаться в широких пределах [3] для наземной аппаратуры от минус 70 °С до плюс 68 °С, а для космической до плюс 500 °С. Верхний пре-

дел температуры возрастает при действии солнечной радиации и зависит от размера и цвета поверхности РЭС, теплоемкости и теплопроводности корпуса, шасси, кожуха и др. Тепловое воздействие на РЭС может быть непрерывным или периодическим при работе аппаратуры в стационарных условиях. Периодическому тепловому воздействию подвергается полевая, самолетная и другая аппаратура, работающая на подвижных объектах. Для аппаратуры, периодически включаемой, перепады температуры достигают 60 °С при времени прогрева до 3 ч, а для аппаратуры авиационной техники перепады могут составлять 150 °С при скорости изменения до 50 град/мин.

Повышенная температура резко увеличивает интенсивность отказов полупроводниковых приборов [5].

На рис. 5 приведен график зависимости интенсивности отказов полупроводниковых приборов от температуры.

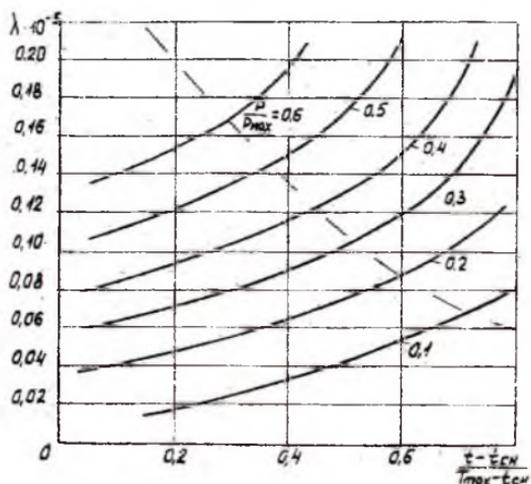


Рис. 5. Зависимость интенсивности отказов полупроводниковых приборов от температуры: $t_{сн}$ — температура, оговоренная техническими условиями на прибор, при которой резко увеличивается интенсивность отказов

Аналогичная зависимость (рис. 6) характеризует интенсивность отказов конденсаторов [5]. Повышенная температура приводит к изменению физико-химических и механических свойств материалов и элементов, что вызывает изменение электрических и механических параметров РЭС [4]. Для диэлектриков изменение температуры приводит к изменению диэлектрической проницаемости, удельного объемного и поверхностного сопротивлений, диэлектрических

потерь, электрической прочности. Повышение температуры металлов приводит к изменению их электрических и физических параметров, изменяется магнитный поток постоянных магнитов, уменьшается магнитная проницаемость магнитодиэлектриков [3]. Расширение металлов при нагреве приводит к изменению размеров деталей, уменьшению прочности и упругости.

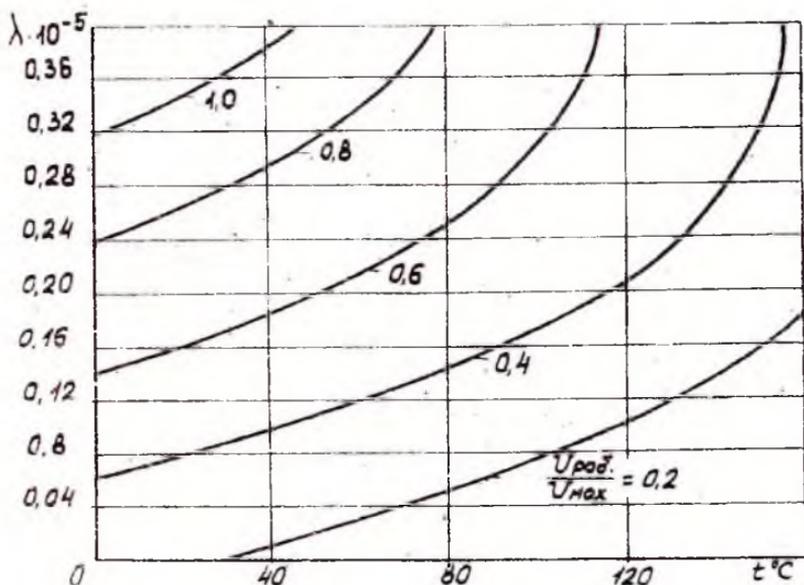


Рис. 6. Зависимость интенсивности отказов конденсаторов от температуры

Различное значение коэффициента линейного расширения металлов и пластмасс приводит к образованию воздушных каналов внутри герметизованных узлов и блоков, по которым может проникать влага [4].

При одновременном действии тепла и механических нагрузок многие материалы легко деформируются. У ряда материалов при нагревании имеет место химическое разложение и старение, приводящее к изменению электрических характеристик. Наиболее сильно подвержены воздействию температуры полупроводниковые приборы, поэтому их температурные режимы всегда ограничены. Нагрев обмоток трансформаторов, дросселей и электродвигателей приводит к размягчению пропиточных материалов, что увеличивает возможность электрического пробоя. Увеличение температуры механизмов РЭС вызывает уменьшение вязкости смазок и расширение металла, что приводит к местному перегреву, замыканию и заеданию подвижных частей, выходу из строя под-

шипников. Под действием низких температур изменяются свойства всех диэлектриков, пластмассы становятся менее ударпрочными. Детали из резины и каучуковых материалов становятся хрупкими и неэластичными, на них образуются трещины. Воскообразные материалы и компаунды на их основе твердеют и растрескиваются. Наиболее вероятны разрушения в местах сопряжения материалов с различными коэффициентами линейного расширения (пластмасса - металл, металл - стекло и т. п.). Наличие различных коэффициентов линейного расширения у заливочных компаундов, кожухов и заливаемых конструкций приводит к растрескиванию, обрыву выводов, образованию раковин. В механизмах РЭС наличие различных коэффициентов линейного расширения у разных материалов и замерзание смазки механических элементов приводят к заеданию и заклиниванию. Понижение температуры отрицательно влияет на паяные соединения и швы. Так при температуре ниже 13,2 °С изменяется кристаллическая решётка олова, увеличиваясь в объёме на 25,6 % оно растрескивается и превращается в серый порошок. Максимальная скорость такого превращения происходит при температуре минус 33°С. Это явление называют «оловянной чумой».

Резкие колебания температуры вне РЭС приводят к тому, что на их внутренних частях конденсируется влага, которая по микротрещинам проникает внутрь некоторых элементов и в зазоры между деталями. При низких температурах вода замерзает и, расширяясь на 10 % в объёме, увеличивает поры, трещины и зазоры. Опыт эксплуатации РЭС показывает, что значительный процент отказов обусловлен воздействием повышенной влажности окружающей среды, особенно в сочетании с повышенной температурой.

При работе РЭС во влажной атмосфере влага обволакивает ее снаружи и проникает внутрь. Водяная пленка на поверхности деталей и материалов быстро загрязняется, вследствие чего увеличивается ее электрическая проводимость, появляются проводящие каналы, возникает емкостный эффект, обусловленный высоким значением диэлектрической проницаемости воды. Кроме этого, изменяются сопротивление изоляции, поверхностное сопротивление, индуктивности и емкости, коэффициент рассеяния и добротность, уменьшаются пробивное напряжение и коэффициент усиления транзисторов. Пленка загрязненной воды закорачивает между собой выводы элементов РЭС [3]. Проникновение влаги сопровождается коррозией материалов, изменением размеров деталей, узлов и элементов конструкций, понижением механической прочности, короткими замыканиями в электрических цепях, уменьшением объемного сопротивления изоляторов, изменением потерь в диэлектриках с изменением частоты питаю-

шего напряжения, появлением токов утечки. При высокой влажности среды увеличивается поглощение парами воды электромагнитной энергии.

На параметры РЭС, кроме рассмотренных факторов, оказывает непосредственное и косвенное влияние пониженное атмосферное давление. При непосредственном влиянии пониженного давления изменяются емкость и допустимое рабочее напряжение конденсаторов с воздушным диэлектриком, уменьшается значение пробивного напряжения в изоляторах и волноводах, между проводниками монтажа [5]. На больших высотах, где давление значительно отличается от нормального, возможны пробой в антенных системах импульсных СВЧ - передатчиков, а также изменение формы излучаемого импульса и диаграммы направленности антенн.

На высотах свыше 2000 м увеличивается вероятность возникновения тихого и скользящего искрового разрядов в негерметизированных высоковольтных выпрямителях и антенно-фидерных системах. При пониженном давлении увеличиваются нагрузки на кожух герметизированных элементов РЭС. Косвенное влияние пониженного атмосферного давления заключается в ухудшении условий воздушного охлаждения РЭС из-за уменьшения плотности воздуха, а также в ухудшении отвода тепла за счет снижения теплоотдачи воздуху.

Наряду с рассмотренными факторами большое влияние на параметры РЭС оказывает биологическая среда, под которой принято понимать поражение РЭС и ее элементов плесенью, микроорганизмами и насекомыми. Наибольшие разрушения возникают под действием плесени. Детали РЭС, выполненные из металла, пластмассы, резины и кожи, под действием плесневых грибков корродируют, теряют внешний вид, механическую прочность и электрические свойства, а линзы и стекла оптических устройств мутнеют и покрываются пятнами.

Плесень очень гигроскопична [1, 3], т. е. впитывает в себя много влаги, образуя на поверхности материала водную пленку, которая способствует его химическому разложению, потере важнейших свойств, и в первую очередь прочности. Разрушая наполнитель и пластификатор пластмасс, плесень разрушает их механическую прочность и значительно ухудшает электрические характеристики. В процессе разложения пластмасс, компаундов и лакокрасочных покрытий образуются органические кислоты (уксусная, лимонная, щавелевая и др.), которые интенсифицируют коррозирование металлических элементов РЭС.

Значительную опасность для РЭС представляют также различные микроорганизмы и насекомые. Термиты уничтожают узлы РЭС из органических материалов, поедая их и разрушая своими выделениями. Красные муравьи,

тараканы, черви, крысы, пресмыкающиеся выводят из строя РЭС, съедая и разрушая изоляционные материалы, каркасы, кожухи и корпуса РЭС, закорачивая и обрывая электрические цепи.

Немаловажное влияние на характеристики РЭС оказывает пыль, представляющая собой мельчайшие частицы различного происхождения и разных физико-химических свойств [5]. Различают неорганическую и органическую пыль. Неорганическая пыль состоит из частиц, имеющих форму пластинок, иголок, круглых чешуек. В ее состав в основном входят кварц, полевой шпат, слюда, хлорид и доломит. Органическая пыль представляет собой споры растений, бактерии, частицы волокон шерсти и хлопка, мельчайшие останки насекомых и растений, а в городах — сажи и смол. Пыль, оседая на поверхности деталей и элементов РЭС, создает условия для их лучшего увлажнения. Наличие в пыли углекислых, сернистых, хлористых и других хорошо растворимых солей также способствует поглощению влаги воздуха. Все это приводит к повышению коррозии металлов. Увлажняющая пыль на лакокрасочных покрытиях вызывает химические реакции, приводящие к их разрушению. Проникая в микротрещины изоляционных материалов, пыль снижает их изоляционные свойства, а попадая в смазочные материалы, способствует их окислению, что приводит к появлению заедания движущихся деталей, ускоряется также износ деталей и контактов.

2.2.2. Влияние механических факторов на РЭС

Механические воздействия, которым подвергается РЭС в процессе эксплуатации, являются наиболее существенными причинами снижения надежности, особенно это касается подвижных объектов, т. к. 70...80 % отказов такой РЭС обусловлено именно действием механических нагрузок [1...3]. Интенсивность отказов аппаратуры увеличивается с ростом частоты вибраций и нагрузки, действующей на РЭС. Увеличение интенсивности отказов обусловлено накоплением скрытых дефектов и может характеризоваться кривой усталостной прочности для материалов конструкции РЭС. Под влиянием даже небольших по амплитуде, но длительных вибраций, усталостные явления могут привести к разрушению изделия. Особенно опасны явления резонанса какой-либо части конструкции РЭС, при которых нагрузка возрастает во много раз. При этом наблюдаются обрывы проводов в месте их закрепления или соединения с деталью, нарушение герметичности, короткие замыкания и т. п. Резонансные явления наблюдаются в конструкциях обычно в полосе частот 15...150 Гц. Для сравнения следует отметить, что мелкие радиоэлементы массой 0,03...12,4 г с диаметром выводов 0,6...1,0 мм и длиной 30 мм имеют резонансные частоты в

диапазоне 200...450 Гц, а при укорочении выводов до 12 мм диапазон резонансной частоты повышается до 1,0...2,0 кГц.

Кроме резонансных явлений при вибрации наблюдается деформация материалов электрорадиоэлементов в пределах упругих свойств, однако это приводит к появлению в электрических сигналах аппаратуры дополнительного спектра частот, называемого *виброшумами*. Это явление чаще всего наблюдается у конденсаторов переменной емкости и потенциометров.

Ускорения, которые возникают при резком изменении скорости или направления движения объекта с аппаратурой, вызывают механические воздействия в виде удара, сопровождающегося затухающей вибрацией на частотах собственных колебаний элементов конструкции. На рис. 7 приведена зависимость перегрузки аппаратуры Δn от частоты вибрации, обусловленной ударными явлениями (область 1) и непосредственно вибрационными процессами (область 2) [4].

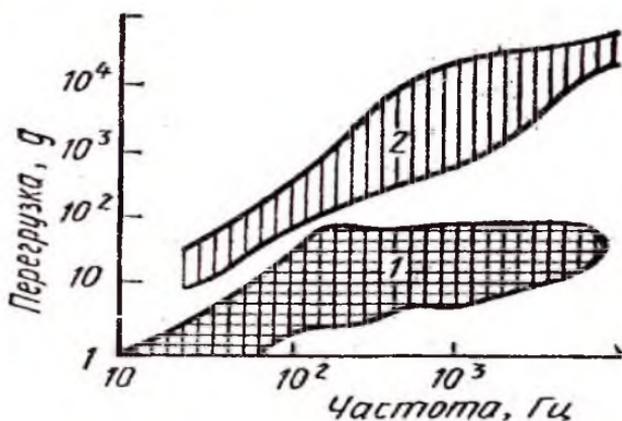


Рис. 7. Зависимость перегрузки РЭС от частоты вибраций:
1 — вибрационная нагрузка; 2 — вибрация, возбуждаемая ударом

При работе турбовинтовых или турбореактивных двигателей самолетов, а также при запуске ракет высвобождается большая энергия в колебаниях звуковой частоты, воздействуя при этом на близко расположенную аппаратуру. Некоторые виды вибраций также сопровождаются выделением энергии звуковой частоты. Это явление принято называть *акустическим шумом* или *акустической вибрацией*.

Акустический шум представляет собой механические колебания частиц воздуха, которые приводят к изменению давления по сравнению с атмосферным статическим давлением. Разность между статическим давлением и давлением в данной точке звукового поля называется *звуковым давлением*. Воздействие акустического шума приводит к механическому возбуждению де-

талей и узлов конструкции РЭС. Отличие его от механических вибраций заключается в распределенном воздействии усилий, зависящих от звукового давления и площади изделия. При чисто механических воздействиях вибрация передается главным образом через точки крепления.

Под действием колебаний звуковых частот в электронных лампах возникает микрофонный эффект, начинают вибрировать реле и объемные проводники. Для уменьшения влияния акустического шума на РЭС необходимо опорные элементы конструкции и кожуха изготавливать из материалов, обладающих высокими демпфирующими свойствами. Желательно иметь жесткие крепления на платах для всех малогабаритных радиодеталей. Хорошие результаты по уменьшению интенсивности воздействия акустического шума дает заливка отдельных групп элементов на печатных платах.

2.2.3. Влияние радиации

Воздействующую на РЭС радиацию можно разделить на естественную и искусственную. К естественной радиации относятся космическое излучение, корпускулярное и рентгеновское излучение Солнца и радиационных поясов Земли. Искусственная радиация возникает в результате ядерных реакций в реакторах или при ядерном взрыве [1...3].

Воздействие радиации на материалы, применяемые в РЭС, зависит от вида радиации, дозы и мощности облучения, распределения энергии по спектру, природы облучаемого вещества и окружающих условий. При этом в материалах происходит:

нарушение кристаллической решетки структуры;

образование атомов примеси других элементов;

ионизация;

изменение структуры, распад молекул, возникновение химических реакций; возникновение фотопроводимости, люминесценции, повышение температуры.

Реакция элементов РЭС на радиацию является более сложной, чем у материалов, т. к. они состоят из разнообразных материалов, в которых под действием радиации протекают различные взаимно влияющие друг на друга процессы. Влияние радиации на РЭС проявляется в изменении параметров элементов РЭС. Эти изменения могут быть как обратимые, так и необратимые. У резисторов и электронных ламп проявляются только обратимые изменения параметров, а у конденсаторов и полупроводниковых приборов как обратимые, так и необратимые изменения.

3. СИСТЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ РЭС

Испытания РЭС производятся на всех стадиях их существования, т. е. как в процессе производства и эксплуатации, так и в процессе их проектирования. Так при проектировании РЭС, состоящем из научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР), испытаниям отводится одно из важнейших мест. При НИР разрабатывают техническое задание на аппаратуру, где устанавливают основные параметры РЭС и условия эксплуатации, рассчитывают надежность, изготавливают экспериментальные образцы для определения направления последующих разработок и усовершенствований, разрабатывают методики последующих испытаний. Приступая к разработке конструкции РЭС, конструктор располагает множеством требований, предъявляемых к РЭС, множеством условий, в которых РЭС должны функционировать, и некоторым объемом исходной информации $J_{и}$. Перед ним стоит задача найти такие конструктивные и технологические решения, которые позволили бы ему получить оптимальную конструкцию РЭС, обладающих требуемыми качественными и количественными характеристиками. В начальной стадии проектирования объем исходной информации $J_{и}$ всегда меньше необходимого объема информации $J_{н}$, т.е.

$$J_{н} > J_{и}: J_{н} - J_{и} = \Delta J. \quad (5)$$

Недостающую информацию ΔJ конструктор получает частями, делая пробы, т. е. изготавливая макеты узлов, РЭС, экспериментальные или опытные образцы. Для извлечения из проб дополнительной недостающей информации проводятся испытания на стадиях НИР и ОКР, причем для получения максимальной информации необходимо правильно выбирать методику испытаний, испытательное оборудование и контрольно-измерительные приборы.

На этапе ОКР выполняют эскизный проект, проводят лабораторные испытания макета РЭС. По результатам испытаний разрабатывают рекомендации по объему и методике испытаний, разрабатывают техническое задание на испытательное оборудование. Полученная в результате испытаний информация позволяет дополнительно судить о соответствии разработанной структуры РЭС предъявленным к ним требованиям. Отличительной особенностью данного этапа является то, что образцы испытываются в условиях, соответствующих реальным условиям эксплуатации. Заключительным этапом ОКР является изготовление опытной партии РЭС. На этом этапе испытываются образцы опытной партии, проектируется и изготавливается контрольно-испытательное оборудование. Испытания образцов опытной партии делятся на две стадии: предварительные и государственные. В ходе предварительных испытаний уста-

наливается соответствие образцов опытной партии предъявляемым к ним требованиям. Предварительные испытания могут проводиться на специальных стендах (стендовые или лабораторные) и непосредственно после установки РЭС на объекте. Стендовые испытания проводятся комиссией по специальной программе испытаний. Государственные испытания проводят с целью полной проверки соответствия опытных образцов заданным в технических условиях требованиям и решения вопроса о целесообразности запуска РЭС в серийное или массовое производство. Объем испытаний зависит от сложности РЭС и требований к их надежности. Чем сложнее РЭС и выше требования надежности, тем больше объем испытаний. Испытания проводят на соответствие всем пунктам технических требований и условий. Результаты испытаний оформляют в виде специального протокола, к которому прилагают программу и методику испытаний, а также перечень испытательного оборудования и измерительных приборов. После получения положительных результатов государственных испытаний вся документация передается предприятию - изготовителю для изготовления установочной серии. Одновременно с изготовлением установочной серии изготавливают все контрольно-испытательные установки и стенды, укомплектовывают их всей необходимой измерительной аппаратурой, составляют всю необходимую для них документацию. По результатам приемки установочной серии оформляют акт, после утверждения которого считают, что производство подготовлено к серийному или массовому выпуску РЭС.

Испытания, проводимые на стадиях серийного или массового производства, носят в основном контрольный характер [3], т. е. предназначены для проверки годности РЭС и стабильности технологических процессов. Они подразделяются на следующие виды: приемосдаточные, периодические (типовые), проверочные.

Приемосдаточные испытания проводят при сдаче заводом - изготовителем РЭС заказчику. Если испытания проводятся без представителя заказчика, то их называют приемочными. Приемосдаточным испытаниям подвергается аппаратура, проверенная ОТК предприятия. Объем и последовательность испытаний предусматриваются в технических условиях. При приемосдаточных испытаниях возможна 100-процентная и выборочная проверка. В случае 100-процентной проверки отказавшая аппаратура возвращается для исправления, а остальная отправляется потребителю. В случае выборочной проверки отказ хотя бы одной из отобранных РЭС приводит к возвращению всей партии для ее повторной проверки ОТК и исправлению.

Периодические (типовые) испытания имеют целью установить соответствие электрических и других параметров РЭС требованиям технических условий в нормальных условиях, а также при различных механических и климатических воздействиях. Периодичность и количество изделий, подвергающихся типовым испытаниям, определяются техническими условиями. Периодическим испытаниям подвергается аппаратура, отобранная из числа прошедших приемосдаточные испытания.

Проверочные испытания — это сокращенные испытания, проводимые с целью определения соответствия параметров РЭС требованиям технических условий в случаях каких-либо схемных, конструктивных или технологических изменений. При проведении проверочных испытаний проверке подлежат те параметры, на которые могут оказать влияние внесенные изменения.

Иногда для проверки уровня надежности, соответствия выпускаемой заводом РЭС техническим условиям осуществляются заводские испытания, которые проводятся в условиях, по возможности имитирующих реальную эксплуатацию. В процессе заводских испытаний выявляются надежность деталей, узлов и блоков, дефекты конструкции, качество сборки, монтажа и регулировки, при этом устанавливается соответствие электрических параметров и количественных показателей эксплуатационной надежности заданным нормам. Виды нагрузок и соответствующие им виды испытаний, имитирующие эти нагрузки, приведены в табл. 3.

Наиболее полную и достоверную информацию о надежности РЭС дают эксплуатационные (натурные) испытания [6]. Этот вид испытаний представляет собой опытную подконтрольную эксплуатацию. При таких испытаниях аппаратура эксплуатируется в реальных условиях, при которых на нее действуют реальные нагрузки в течение заданного времени эксплуатации. Отличается этот вид испытаний от обычной эксплуатации тем, что периодически производятся измерения заданных параметров и проверка состояния аппаратуры. Основные недостатки испытаний заключаются в большой продолжительности испытаний и необходимости эксплуатации в реальных условиях. Последнего недостатка лишены лабораторные испытания. Эти испытания по продолжительности близки к эксплуатационным, но на аппаратуру при этом действуют не случайные, а определенные нагрузки.

Таблица 3. Классификация видов испытаний и нагрузок

Вид нагрузки	Вид испытаний
Вибрационная	Вибропрочность. Виброустойчивость
Ударная	Ударная устойчивость при многократных ударах. Ударная прочность при многократных ударах. Воздействие одиночных ударов с большим ускорением. Прочность при падении
Линейная	Устойчивость к воздействию линейной нагрузки
Температурная	Теплоустойчивость. Хладоустойчивость. Устойчивость к циклическому изменению температуры, к тепловому удару
Звуковое давление	Устойчивость к воздействию акустических шумов
Гидростатическое давление	Устойчивость к повышенному гидростатическому давлению
Атмосферное давление	Устойчивость к пониженному атмосферному давлению
Влажность	Влагоустойчивость
Осадки	Брызгопроницаемость. Устойчивость к воздействию инея и росы
Вода	Герметичность. Качество уплотнения кожухов. Водонепроницаемость и водозащищенность
Пыль	Пылезащищенность. Пылеустойчивость
Солнечная радиация	Устойчивость к воздействию солнечной радиации
Плесневые грибки	Грибоустойчивость
Морской туман	Устойчивость к воздействию морского (соляного) тумана
Морская качка	Устойчивость к качке и длительным наклонам

4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Существует функциональная зависимость между показателями надежности РЭС, производственными затратами и выполнением плана выпуска продукции [3]. Если, например, тщательным контролем добиваться чрезмерно высокой точности изготовления аппаратуры, то несоразмерно возрастает себестоимость изделия и планомерный выпуск изделий становится практически невозможным. С другой стороны, уменьшение затрат на контроль приводит к увеличению брака, что в конечном итоге также увеличивает себестоимость. Следует иметь в виду, что простое увеличение затрат на контрольно-испытательные работы само по себе не уменьшает затрат, связанных с производством и эксплуатацией изделий. Наибольший эффект достигается при рациональной методике испытаний, анализе их результатов и последующем воздействии на технические процессы производства и эксплуатации РЭС. Эффективность распределения этих затрат прежде всего зависит от определения продолжительности испытаний и размера выборки изделий для проведения испытаний. Размер выборки важен потому, что при большой выборке велики затраты средств и времени, а при малых выборках результаты испытаний имеют малую достоверность информации. Оптимальной выборкой является такая, при которой достигается минимальная стоимость испытаний при максимальной оперативности получения результатов.

На практике используют значительное количество различных выборок [3].

Представительной выборкой (репрезентативной) называется такая выборка, при которой изделия, входящие в выборку, в полной мере отражают характер и структуру генеральной совокупности всех РЭС.

Повторной выборкой называется выборка, в которой изделия после испытаний возвращаются в генеральную совокупность.

Бесповторной выборкой называется такая, в которой изделия после испытаний не возвращаются в генеральную совокупность, при этом в выборку изделие может попасть лишь один раз.

Преднамеренной выборкой называется выборка, в которой изделия отбираются с заранее оговоренными признаками.

Случайной называется выборка, в которой вероятность попадания изделий в выборку одинакова.

Единовременной называется выборка, в которую изделия выбираются из партии независимо от времени изготовления.

Общепроизводственной выборкой называется выборка, в которую входят изделия одного типа независимо от источника изготовления.

Текущей выборкой называется выборка, составленная из изделий, изготовленных последовательно во времени.

Расслоенной называется выборка, в которую изделия отбираются в заданных объемах из разных частей контролируемой совокупности.

Выборки неточно характеризуют всю партию изделий. Однако результаты испытания выборки позволяют делать выводы о свойствах всей партии (генеральной совокупности).

В партии изделий, состоящей, например, из интегральных микросхем (ИМС), параметры, характеризующие её свойства, могут отличаться друг от друга, но годными считаются только те ИМС, у которых все параметры соответствуют заданным границам их допустимых вариаций. В партии из N ИМС могут содержаться D дефектных. Степень пригодности партии изделий к сдаче Заказчику для применения в условиях эксплуатации определяют по относительной величине $Q = D/N$ (Q - генеральная характеристика партии изделий) сравнением фактического значения Q_{ϕ} с нижней Q_H и верхней Q_B границами. Партию изделий считают хорошей (удовлетворяющей условиям годности партии изделий), если выполняется условие: $Q_{\phi} \leq Q_H$. Партию изделий считают плохой (не удовлетворяющей условиям годности партии изделий), если выполняется условие: $Q_{\phi} \geq Q_B$. Партию изделий считают допустимой, если $Q_H < Q_{\phi} < Q_B$. Для оценки всей партии изделий по Q_{ϕ} не обязательно испытывать все изделия, из которых она состоит. Для уменьшения затрат на испытания достаточно испытать выборку из " n " изделий и выявить в ней " d " дефектных. Относительное количество $q = d/n$ дефектных изделий " d ", обнаруженных в выборке объема " n ", называют частотью дефектных изделий, статистической вероятностью, выборочной характеристикой или оценкой генеральной характеристики партии изделий Q . С увеличением объема выборки эффект случайно-

$$\lim_{n \rightarrow N} \frac{d}{n} \rightarrow Q.$$

Оценка точности характеристики генеральной совокупности по выборке осуществляется с помощью таких понятий, как достоверность или доверительные границы [7]. Достоверность характеризует степень нашего доверия к оценке результатов испытаний изделий из выборки. Характеристики, полученные на основе испытаний изделий выборки, называют *оценками генеральной совокупности*.

Для предсказания свойств выборок используют теорию вероятностей. Так, если случайная величина X принимает дискретные значения $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, \dots, x_n\}$ с соответствующими вероятностями $\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, \dots, p_n\}$, то характеристикой положения этой случайной величины X на числовой оси является т.н. *математическое ожидание (первый центральный момент)*.

Основными характеристиками генеральной совокупности являются

$$M(x) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i$$

так как

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1, \quad (6)$$

где x_i — результат испытания изделия; P_i — вероятность появления результата испытания; n — количество изделий в выборке.

Если случайная величина X принимает дискретные значения $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, \dots, x_n\}$ с одинаковыми вероятностями, то её математическое ожидание $M(x)$ (среднее значение) рассчитывают по формуле

$$M(x) = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (7)$$

Случайная величина X как бы рассеивается вокруг математического ожидания $M(x)$, а за меру отклонения X от $M(x)$ принимают дисперсию (второй центральный момент).

Дисперсия

$$\sigma_{(x)}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M(x) - x_i)^2, \quad (8)$$

математическое ожидание для отдельной выборки

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (9)$$

среднеквадратичное отклонение для выборки

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M(x) - x_i)^2}{n-1}}. \quad (10)$$

В теоретических исследованиях при случайном характере формирования бесповторных выборок из генеральной совокупности объемом N , содержащей D дефектных изделий, используют гипергеометрический закон распределения

дискретных величин, для которого вероятность того, что в выборке объемом n , будут присутствовать d дефектных изделий, определяют по формуле

$$P_{n,d} = \frac{C_D^d \cdot C_{N-D}^{n-d}}{C_N^n},$$

$$\text{где } C_{N-n}^{n-d} = \frac{(N-n)!}{(n-d)!(N-D+n-d)!},$$

$$C_D^d = \frac{D!}{d!(D-d)!},$$

$$C_N^n = \frac{N!}{n!(N-n)!}. \quad (11)$$

Математическое ожидание количества дефектных изделий в выборке для гипергеометрического закона

$$M(d) = n \cdot Q, \quad (12)$$

где

$$Q = D/N.$$

Дисперсия σ^2 может быть определена по формуле

$$\sigma^2 = nQ(1-Q) \left[1 - \frac{n-1}{N-1} \right]. \quad (13)$$

Для повторных выборок, когда испытанное изделие возвращается в исходную генеральную совокупность, вероятность $P_{n,d}$ обнаружения d дефектных изделий в выборке из n испытанных изделий определяют по *Биномиальному* закону распределения:

$$P_{n,d} = C_n^d \left(1 - \frac{D}{N}\right)^d \left(\frac{D}{N}\right)^{n-d}. \quad (14)$$

Начиная с $P_{n,0}$ вероятности $P_{n,d}$ могут быть вычислены по следующей рекуррентной формуле:

$$\frac{P_{n,d}}{P_{n,d-1}} = \frac{(n-d+1) \left(1 - \frac{D}{N}\right)}{d \frac{D}{N}}. \quad (15)$$

Математическое ожидание количества дефектных изделий в выборке для биномиального закона $M(d) = n \cdot Q$.

Дисперсия σ^2 для биномиального закона может быть определена по выражению

$$\sigma^2 = n \cdot Q(1-Q). \quad (16)$$

Наиболее часто для дискретных величин в теоретических исследованиях используют закон Пуассона, при этом вероятность того, что d изделий, находящихся в выборке объемом n , будут забракованы, определяют по зависимости

$$P_{n,d} = \frac{a^d}{d!} e^{-a}. \quad (17)$$

где d — количество бракованных изделий в выборке; $a = n \cdot Q$, Q — вероятность отказа (брака) для генеральной совокупности. Для партии РЭС (генеральной совокупности), состоящей из N изделий и содержащей D дефектных изделий, вероятность отказа можно определить как

$$Q = \frac{D}{N}.$$

Математическое ожидание количества дефектных изделий в выборке для закона Пуассона $M(d) = n \cdot Q$.

Дисперсия σ^2 может быть определена по формуле

$$\sigma^2 = n \cdot Q. \quad (18)$$

Сущность методики выборочных испытаний заключается в том, что на основе вычисления соответствующих статистических оценок параметров, определенных по ограниченному числу опытных данных, принимается решение о наиболее вероятном значении оцениваемых параметров. Выдвигаются две альтернативные гипотезы относительно неизвестного параметра генеральной совокупности (партии): годен или негоден. Задача состоит в установлении такого оптимального выбора решения, по которому можно было бы на основании выборки заданного объема n принять одну гипотезу и отвергнуть другую. В связи с ограниченностью выборки можно отвергнуть гипотезу, когда в действительности она верна (допустить так называемую ошибку 1-го рода), или принять ее, когда она неверна (допустить ошибку 2-го рода).

Для любой изготавливаемой РЭС в технических условиях на неё указывается два значения вероятности отказа:

значение вероятности отказа РЭС за период ее рабочего цикла t_p , принятое в качестве номинального и обеспеченное допустимым уровнем производства РЭС $Q_n(t_p)$;

максимально допустимое значение вероятности отказа РЭС за период ее рабочего цикла t_p , при котором еще возможно выполнение изделием его основных функций $Q_n(t_p)$. Установление двух показателей вероятности отказа соответствует разделению всей аппаратуры в зависимости от фактического значения $Q_p(t_p)$ на 3 категории [5]:

хорошие РЭС:

$$Q_n(t_p) < Q_\phi(t_p); \quad (19)$$

допустимые РЭС:

$$Q_n(t_p) < Q_\phi(t_p) < Q_v(t_p); \quad (20)$$

плохие РЭС:

$$Q_v(t_p) \leq Q_\phi(t_p). \quad (21)$$

В процессе испытаний необходимо проверить две конкурирующие гипотезы — гипотезу H_0 , заключающуюся в выполнении условия (20), и гипотезу H_1 , заключающуюся в выполнении условия (21). Используя статистические данные, необходимо принять гипотезу H_0 (отвергнуть H_1) или отвергнуть ее, приняв соответственно H_1 . В процессе такой статистической проверки возможны ошибки двух родов, которые являются следствием случайности испытаний. Количественно эти ошибки оцениваются некоторой вероятностью того, что будет допущена ошибочная статистическая оценка.

Вероятность ошибки 1-го рода называется *риском поставщика* (изготовителя РЭС) и обозначается α . Риск поставщика определяется как наибольшая вероятность того, что в результате испытаний хорошие РЭС, т.е. соответствующие условию (19), будут признаны плохими и забракованы.

Вероятность ошибки 2-го рода называется *риском заказчика* (потребителя РЭС) и обозначается β . Риск заказчика определяется как наибольшая вероятность того, что в результате испытаний плохие РЭС, т.е. соответствующие условию (21), будут признаны годными и приняты.

Для оценки результатов испытаний по определению соответствия показателей надежности РЭС установленным требованиям разработаны математические методы, обеспечивающие требуемую достоверность оценки при заданных значениях рисков α , β и соотношения $\frac{Q_v(t_p)}{Q_n(t_p)}$. Это соотношение определяет со-

бой требуемую точность оценки фактического значения вероятности отказа $Q_\phi(t_p)$, поскольку при $Q_\phi(t_p) = Q_n(t_p)$ РЭС должны браковаться с вероятностью

$$P_{бр} = 1 - \beta, \quad (22)$$

а при $Q_\phi(t_p) = Q_v(t_p)$ они должны приниматься с вероятностью

$$P_{пр} = 1 - \alpha. \quad (23)$$

Вероятность приемки или забракования РЭС, для которых фактические показатели надежности имеют промежуточное значение, т. е. выполняется условие (20), при этом во внимание не принимается. График зависимости вероятности приемки РЭС $P_{пр}$ и вероятности их забракования $P_{бр}$ от фактического значения вероятности отказа $Q_{ф}(t_p)$ имеет вид, показанный на рис. 8.

Обычно при приемосдаточных испытаниях с согласия заказчика устанавливается процент дефектных изделий, который допускается в выборке при приемке партии. Если в выборке оказывается дефектных изделий больше, то такая партия бракуется.

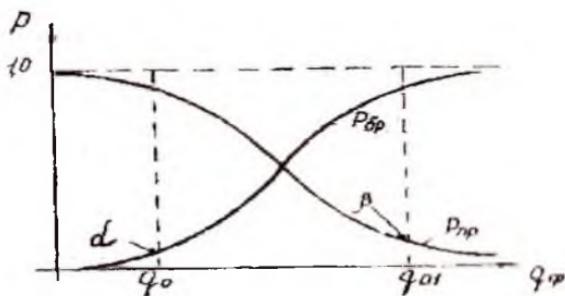


Рис. 8. Зависимость вероятности приемки $P_{пр}$ и бракования $P_{бр}$ от вероятности отказа РЭС

Наименьшее число отказавших изделий, при котором результат считают отрицательным, называют *браковочным числом* C' , а наибольшее число отказавших изделий, при котором результат испытаний считают положительным, называют *приемочным числом* C .

На практике нашли применение следующие методы оценки параметров изделий однократной выборки, двухкратной выборки, последовательного анализа [4].

Сущность *метода однократной выборки* состоит в том, что контроль надежности РЭС производится после проведения испытаний всего заранее рассчитанного объема выборки. Оценка надежности аппаратуры при этом возможна двумя способами. Первый способ заключается в том, что объем выборки n_0 , который требуется для испытаний, определяется по заданному значению $Q_n(t_p)$ и известному объему партии РЭС N при допустимых значениях $Q_b(t_p)$ и β . Если в результате испытаний этой выборки будет получен хотя бы один отказ, то считают, что партия РЭС не соответствует заданным требованиям. Такой способ называют *методом испытаний с нулевым приемочным числом*.

При оценке надежности вторым способом испытания ограничиваются рассчитанным допустимым числом отказов в выборке. Количество экземпляров аппаратуры n_0 , необходимое для испытаний, определяется по заданным значениям рисков α , β и соотношения $\frac{Q_n(t_p)}{Q_n(t_p)}$.

Если число отказавших изделий за время испытаний меньше или равно приемочному числу, то партия изделий принимается, в противном случае — бракуется. Приемочное число C выбирают, по возможности, небольшим из экономических соображений, т. к. с его увеличением резко возрастает объем выборки. В то же время, уменьшая приемочное число для успешной сдачи продукции, необходимо увеличивать уровень надежности продукции. Объем выборки определяют по таблицам или графикам, задавшись значениями вероятности брака, приемочным числом и риском заказчика.

Поскольку повышение приемочного числа может оказаться простым совпадением из-за случайности при комплектовании выборки (риск изготовителя), то допускают испытание второй, дополнительной выборки для подтверждения приемочного уровня надежности. Таким образом, этот способ, называемый *методом двукратной выборки*, предусматривает испытания второй выборки, если число отказов в первой выборке превышает приемочное число C , но меньше браковочного C' . Значение приемочного числа C_2 для второй выборки определяют по таблицам или графикам, исходя из известных значений вероятности, риска заказчика и количества изделий в двух выборках. Если число отказавших изделий во второй выборке окажется меньше или будет равно приемочному числу C_2 , то партия принимается, в противном случае бракуется.

Сущность *метода последовательного анализа* состоит в том, что проверка гипотез осуществляется последовательно, по мере накопления статистического материала. После получения первой реализации случайной величины рассматривается три возможных решения:

принимается гипотеза H_1 , т. е. отклоняется альтернативная гипотеза H_0 ;

принимается гипотеза H_0 , т. е. отклоняется H_1 ;

принимается решение о продолжении испытания, т. к. полученная статистика не дает основательных доказательств ни в пользу гипотезы H_1 , ни в пользу гипотезы H_0 .

Проверка гипотез заканчивается, если принимается первое или второе решение. При проверке гипотез рассматривают три несовместимые области: принятия гипотезы H_0 ; принятия гипотезы H_1 ; безразличия, когда не делается предпочтения ни одной из гипотез.

Область безразличия ограничена границами $C'(n_{\Sigma})$ и $C(n_{\Sigma})$, причем $C'(n_{\Sigma}) > C(n_{\Sigma})$, которые могут быть вычислены по известным значениям риска изготовителя α , заказчика β и допустимым значениям $Q_n(t_p)$ и $Q_b(t_p)$. Дискретные значения C и C' , соответствующие границам $C'(n_{\Sigma})$ и $C(n_{\Sigma})$, зависят от суммарного объема всех выборок n_{Σ} [4]:

$$\begin{aligned} C &= C(n_{\Sigma}), \\ C' &= C'(n_{\Sigma}). \end{aligned} \quad (24)$$

На практике обычно пользуются графическими зависимостями границ $C'(n_{\Sigma})$ и $C(n_{\Sigma})$, пример которых приведен на рис. 9.

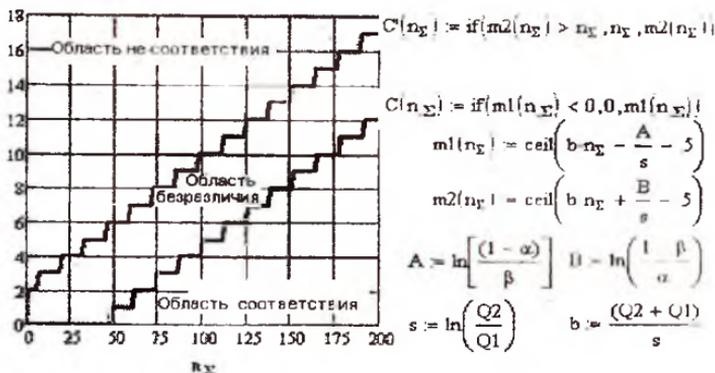


Рис. 9. Номограмма для определения браковочного $C'(n_{\Sigma})$ и приемочного $C(n_{\Sigma})$ чисел ($\alpha = 0,15$; $Q_n(t_p) = 0,02$; $\beta = 0,05$; $Q_b(t_p) = 0,05$)

При испытаниях РЭС, изготовленных по отработанному технологическому процессу, изделия отбираются через равные промежутки времени t' равными группами [7]:

$$t' = t_n / K, \quad (25)$$

где t_n — период испытаний; K — количество групп.

Количество групп определяется из соотношения общего количества изделий в выборке n и количества изделий в одной группе n_r :

$$K = n / n_r.$$

Оценка результатов испытаний производится по окончании испытаний последней группы. Если суммарное число изделий за все время испытаний не превышает приемочного числа, то заданный уровень надежности обеспечен. Для оперативного контроля технологического процесса по окончании испытаний каждой группы проводят условную оценку надежности.

Если время испытаний t_n меньше времени эксплуатации изделия t , для которого задана величина $P(t)$, то для определения вероятности безотказной рабо-

ты $P_u(t_u)$ изделия за время испытаний t_u воспользуемся выражением для экспоненциального закона распределения вероятностей

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (26)$$

где λ — интенсивность отказов изделия,
тогда получим

$$P_u(t_u) = e^{-\lambda t_u}. \quad (27)$$

Логарифмируя уравнения (26) и (27) и выражая λ из одного из них после подстановки в другое, получим

$$\ln[P_u(t_u)] = \frac{t_u}{t} \ln[P(t)]$$

Откуда следует:

$$P_u(t_u) = P(t)^{\frac{t_u}{t}}. \quad (28)$$

Назначая значения времени испытаний t_u , для заданных значений t и $P(t)$ из формулы (21) можно определить искомую величину $P_u(t_u)$. Обычно для нахождения вероятности безотказной работы изделия за время испытаний пользуются табл. 4.

Таблица 4. Вероятность безотказной работы изделий $P_u(t_u)$ за время испытаний t_u для заданных уровней надежности $P(t)$ испытываемых изделий

$\frac{t_u}{t}$	Уровни надежности изделий $P(t)$			
	0,999	0,990	0,900	0,800
	Вероятность безотказной работы $P_u(t_u)$			
0,1	0,9999	0,9990	0,9890	0,9780
0,5	0,9995	0,9950	0,9480	0,8940
1,0	0,999	0,990	0,900	0,800

Учитывая, что вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с вероятностью отказов $Q(t)$ соотношением $Q(t) = 1 - P(t)$ и, соответственно, $Q_u(t_u) = 1 - P_u(t_u)$, после подстановки в выражение (21) получаем

$$Q_u(t_u) = 1 - [1 - Q(t)]^{\frac{t_u}{t}}. \quad (29)$$

В тех случаях, когда $Q(t) \ll 1$, можно использовать приближенное более простое выражение: $Q_u(t_u) \approx \frac{t_u}{t} Q(t)$.

Для определения количества n изделий в выборке можно воспользоваться выражением (17), которое с введением понятия риска заказчика будет иметь вид

$$\beta = \sum_{d=0}^c \frac{a^d}{d!} e^{-a} = \sum_{d=0}^c \frac{[n \cdot Q_u(t_u)]^d}{d!} e^{-n \cdot Q_u(t_u)} \quad (30)$$

Из формулы (30) или табл. 5 определяют значение $a = n \cdot Q_u(t_u)$, после чего находят величину объема выборки n :

Таблица 5. Объем выборки n от величин риска заказчика β и приемочного числа C при заданном уровне надежности $P_u(t_u)$

β	C	Уровни надежности изделий $P_u(t_u)$			
		0,999	0,990	0,90	0,80
0,1	0	2391	229	22	10
	1	3888	388	37	18
	2	5320	532	52	25
0,2	0	1599	159	15	7
	1	2999	299	29	14
	2	4279	427	42	20

$$n = \frac{a}{Q_u(t_u)} = \frac{a}{1 - P_u(t_u)} \quad (31)$$

На практике для определения значения n часто пользуются графической зависимостью выражения (30), приведенной на рис. 10.

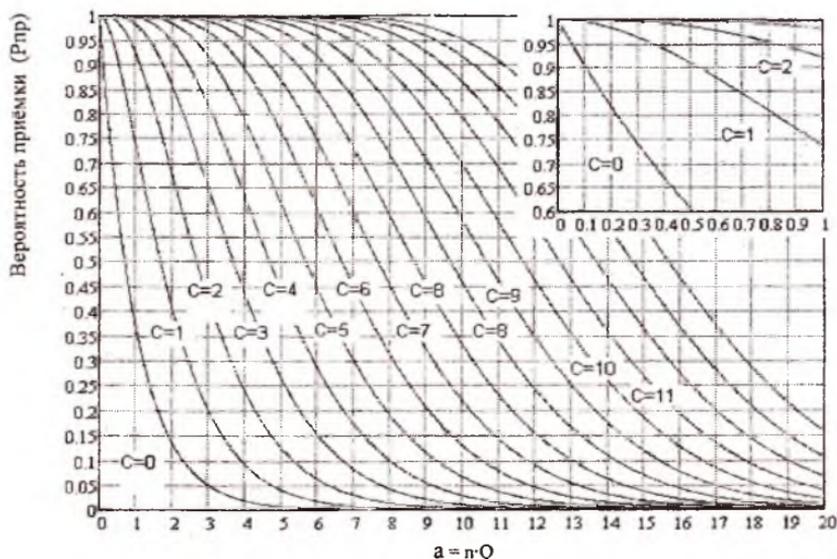


Рис. 10. Номограмма для определения объема выборки или риска заказчика и риска поставщика

Рассмотрим составление плана испытаний по двум заданным уровням надежности: $P_H = 1 - Q_H(t_u)$ — соответствующему риску поставщика α и $P_B = 1 - Q_B(t_u)$ — соответствующему риску заказчика β .

Для определения значений n и C удобно воспользоваться графическими зависимостями (см. рис. 10).

Составление плана испытаний рассмотрим на примере.

Пример. Дано: $P_H = 0,99$ ($Q_H = 1 - P_H = 0,01$); $\alpha = 0,15$; $P_B = 0,9$ ($Q_B = 0,1$); $\beta = 0,05$:

1) определяем вероятность приемки партии РЭС по результатам испытаний выборки при заданном риске изготовителя $P_{пр} = 1 - \alpha = 1 - 0,15 = 0,85$;

2) определяем a' по значениям $P_{пр}$ и $C = 0$, пользуясь графиком

$$a' = n'(1 - P_H) = n' Q_H = 0,16;$$

3) вычисляем значение n'

$$n' = a' / (1 - P_H) = 0,16 / (1 - 0,99) = 16;$$

4) определяем вероятность приёмки бракованной партии при заданном риске заказчика $P_{бр} = \beta = 0,05$;

5) определяем a'' по значениям β и $C = 0$, пользуясь графиком $a'' = 3,0$;

6) вычисляем объём выборки n'' : $n'' = a'' / (1 - P_B) = a'' / Q_B = 3 / (1 - 0,9) = 30$;

7) сопоставляем полученные значения. Если $n' < n''$, то увеличиваем приёмочное число C на одну единицу и повторяем расчет пп. 2...6. Если $n' \geq n''$, то приёмочное число C найдено. В качестве объёма выборки может быть принято любое целое число в пределах от n' до n'' ($n = n' \dots n''$). В рассматриваемом примере для $C=1$ получаем $n' = 68$, $n'' = 47$, т. е. $n' > n''$ и приёмочное число $C=1$ определено. Объём выборки может быть выбран в пределах от 47 до 68. Если в целях экономии средств на испытания объём выборки будет принят минимальным ($n = 47$), то риск заказчика останется неизменным, а риск изготовителя уменьшится;

8) определим риск изготовителя α' , если объём выборки принять $n = n'' = 47$. Для этого определяем значение

$$a' = n(1 - P_H) = n Q_H = 47 \cdot 0,01 = 0,47.$$

Из графика (см. рис. 10) для $C=1$ и $a' = 47$ определяем вероятность приёмки $P_{пр} = 0,92$ и значение риска изготовителя $\alpha' = 1 - P_{пр} = 0,08$, т. е. риск изготовителя уменьшается с заданного значения 0,15 до 0,08, что удовлетворяет его интересам;

9) если объём выборки принять наибольшим ($n = 68$), то риск изготовителя останется неизменным, а риск заказчика уменьшится. Для определения риска заказчика в этом случае определяем значение

$$a'' = n''(1 - P_B) = 68(1 - 0,9) = 6,8.$$

Из графика (см. рис. 10) определяем значение риска заказчика $P_{бр} = \beta' = 0,001$,

т. е. риск заказчика уменьшается по сравнению с заданным значением, что удовлетворяет интересам заказчика;

10) если объем выборки в середине интервала допустимых значений, например $n = 55$, тогда риск изготовителя и риск заказчика будут меньше заданных. Для определения их найдём новые численные значения a' и a'' :

$$a' = n Q_H = 55 (1 - 0,99) = 0,55; \quad a'' = n Q_B = 55 (1 - 0,9) = 5,5.$$

Из графика (см. рис. 10) определяем значение вероятности приёмки партии изделий ($P_{пр} = 0,9$) и вероятность бракования её ($P_{бр} = 0,02$), что соответствует риску изготовителя $\alpha = 0,1$ и риску заказчика $\beta = 0,02$.

В качестве другого примера рассмотрим следующую задачу.

Определить объем выборки и приемочное число для 200 - часовых приемодаточных испытаний партии из 10000 микросхем, если при 300 - часовой эксплуатации в условиях повышенной влажности по условию заказчика допускается отказ до 3000 микросхем, а по условиям изготовителя допускается отказ не более чем 1000 микросхем, причем риск заказчика не должен превышать 5%, а риск изготовителя 15%.

Таким образом, исходя из условий задачи, имеем: $N = 10000$; $\beta = 0,05$; $\alpha = 0,15$; $D_B = 3000$; $D_H = 1000$; $t_{исп} = 200$ ч; $t_{экспл} = 300$ ч.

Определим объем выборки n и приемочное число C .

Решение

1. Определим верхнюю Q_B и нижнюю Q_H границы условий эксплуатации:

$$Q_B = \frac{D_B}{N} = \frac{3000}{10000} = 0,3; \quad Q_H = \frac{D_H}{N} = \frac{1000}{10000} = 0,1.$$

2. Пересчитаем условия годности изделий на условия испытаний:

$$Q'_B \approx \frac{t_u}{t_s} Q_B = \frac{200}{300} \cdot 0,3 = 0,19; \quad Q'_H \approx \frac{t_u}{t_s} Q_H = \frac{200}{300} \cdot 0,1 = 0,066.$$

3. Принимаем $C = 0$, тогда

$$\text{для } \beta = 0,05 \quad a' = n_0' \cdot Q'_B = 2,9 \Rightarrow n_0' = \frac{2,9}{0,19} = 15,26 \text{ берем равным } 16;$$

$$\text{для } \alpha = 0,15 \quad a = n_0 \cdot Q'_H = 0,19 \Rightarrow n_0 = \frac{0,19}{0,066} = 2,89 \text{ берем равным } 3.$$

Так как $n_0' = 16 > n_0 = 3$, принимаем условия изготовителя $n_0' = 3$. По графику находим: при $a' = 3 \cdot 0,19 = 0,57$ риск заказчика $\beta = 0,6 > 0,05$, поэтому увеличиваем C .

$$4. \text{ Берем } C = 1, \text{ тогда для } \beta = 0,05 \quad a' = n_0' \cdot Q'_B = 4,5 \Rightarrow n_0' = \frac{4,5}{0,19} = 23,68$$

$$\text{берем равным } 24; \text{ для } \alpha = 0,15 \quad a = n_0 \cdot Q'_H = 0,7 \Rightarrow n_0 = \frac{0,7}{0,066} = 10,6 \text{ берем } 11.$$

Так как $n_0' = 24 > n_0 = 11$, принимаем условия изготовителя $n_0' = 11$. По графику находим: при $a' = 11 \cdot 0,19 = 2,09$ риск заказчика $\beta = 0,4 > 0,05$, поэтому увеличиваем C .

$$5. \text{ Берем } C = 2, \text{ тогда для } \beta = 0,05 \ a' = n_0' \cdot Q'_B = 6,3 \Rightarrow n_0' = \frac{6,3}{0,19} = 33,16;$$

берем равным 34; для $\alpha = 0,15$, $a = n_0 \cdot Q'_H = 1,3 \Rightarrow n_0 = \frac{1,3}{0,066} = 19,7$ берем 20.

Так как $n_0' = 34 > n_0 = 20$, принимаем условия изготовителя $n_0' = 20$. По графику находим: при $a' = 20 \cdot 0,19 = 3,8$ риск заказчика $\beta = 0,28 > 0,05$, поэтому увеличиваем C .

$$6. \text{ Берем } C = 3, \text{ тогда для } \beta = 0,05 \ a' = n_0' \cdot Q'_B = 7,5 \Rightarrow n_0' = \frac{7,5}{0,19} = 39,47;$$

берем равным 40; для $\alpha = 0,15$, $a = n_0 \cdot Q'_H = 2,1 \Rightarrow n_0 = \frac{2,1}{0,066} = 31,81$ берем 32.

Так как $n_0' = 40 > n_0 = 32$, принимаем условия изготовителя $n_0' = 32$. По графику находим: при $a' = 32 \cdot 0,19 = 6,08$ риск заказчика $\beta = 0,15 > 0,05$, поэтому увеличиваем C .

$$7. \text{ Берем } C = 4, \text{ тогда для } \beta = 0,05, \ a' = n_0' \cdot Q'_B = 8,7 \Rightarrow n_0' = \frac{8,7}{0,19} = 45,79;$$

берем равным 46; для $\alpha = 0,15$, $a = n_0 \cdot Q'_H = 2,75 \Rightarrow n_0 = \frac{2,75}{0,066} = 41,6$ берем 42.

Так как $n_0' = 46 > n_0 = 42$, принимаем условия изготовителя $n_0' = 42$. По графику находим: при $a' = 42 \cdot 0,19 = 7,98$ риск заказчика $\beta = 0,09 > 0,05$, поэтому увеличиваем C .

$$8. \text{ Берем } C = 5, \text{ тогда для } \beta = 0,05, \ a' = n_0' \cdot Q'_B = 10 \Rightarrow n_0' = \frac{10}{0,19} = 52,6;$$

берем равным 53; для $\alpha = 0,15$ $a = n_0 \cdot Q'_H = 3,7 \Rightarrow n_0 = \frac{3,7}{0,066} = 56,06$ берем 57.

Так как $n_0 = 57 > n_0' = 53$, принимаем условия заказчика $n_0 = 53$. По графику находим: при $a = 53 \cdot 0,066 = 3,5$; $\alpha = 1 - 0,87$, тогда $\alpha = 0,13 < 0,15$. Окончательно определяем объём выборки $n = 53$, приёмочное число $C = 5$.

Для постоянного контроля стабильности хода технологического процесса и своевременной его корректировки в настоящее время находят широкое распространение выборочный активный, количественный текущий контроль. Так как при таком контроле выборка подвергается количественной оценке параметров РЭС с последующей статистической обработкой полученных результатов,

контроль получил название *статистический текущий контроль* [7]. При осуществлении статистического текущего контроля необходимо предварительно разработать систему организационных мероприятий, к которым относятся:

установление количественных и качественных параметров РЭС и допусков на них;

установление объема выборки;

периодичность контроля;

порядок и последовательность выборок;

условия и методика контроля;

форма документации для регистрации основных параметров контролируемых РЭС.

При выборе контролируемых параметров следует учитывать, что одновременное наблюдение за несколькими параметрами усложняет и замедляет процесс контроля, поэтому целесообразно выбирать ограниченное число параметров или какой-либо обобщенный параметр, контроль которого свидетельствовал бы о качестве всего изделия.

Объем выборки определяется в зависимости от вида производства, применяемых средств контроля, требуемой точности измерений, квалификации рабочих и контролеров, производительности труда и других факторов, определяющих в конечном итоге экономическую целесообразность статистического контроля. Из математической статистики известно, что для оценки параметров всех изделий, входящих в генеральную совокупность, достаточно контролировать выборку определенного объема n . Периодичность контроля зависит от режимов производственного процесса и работы оборудования, от времени, необходимого для производства РЭС, его контроля и обработки данных.

При непрерывном производстве контроль выполняют через равные промежутки времени, уменьшая их в конце дня. Периодичность следует увеличивать после наладки оборудования или смены инструмента и в начальный период работы оборудования. Порядок и последовательность взятия выборок зависит от принятой системы организации производственного процесса и применяемого при этом оборудования.

Если качество РЭС зависит от применяемого инструмента и оборудования, параметры которых могут изменяться в процессе производства, то контроль целесообразно осуществлять через заранее установленные промежутки времени. При установлении последовательности измерения параметров РЭС необходимо руководствоваться организационно-техническими соображениями и производственной целесообразностью.

Если РЭС характеризуется несколькими параметрами, контролируруемыми различными измерительными приборами, то сначала целесообразно измерить один параметр у всех изделий, затем другой и т. д. Начинать измерение целесообразно, применяя наиболее сложное контрольно-измерительное оборудование.

Для получения достаточно быстрого и наглядного представления о ходе технологического процесса, позволяющего предупредить возникновение или увеличение брака, следует построить точечную контрольную диаграмму [5], в которой по оси ординат откладывают возможные признаки качества (контролируемый параметр, его среднее значение и т. д.), а по оси абсцисс откладывают номера образцов, проб и выборок. Через середину диаграммы (рис. 11) проводят центральную горизонтальную линию 1, ордината которой представляет собой заданное значение признака качества (номинал). Выше и ниже центральной линии на точечной контрольной диаграмме наносят еще две горизонтальные линии 3, соответствующие техническим пределам (пределам допуска), верхняя отвечает максимально допустимому (ВТД), а нижняя — минимально допустимому (НТД) значениям пределов допуска. Участок диаграммы, заключенный между этими двумя линиями 3, называется полем допуска. Кроме этого на точечной контрольной диаграмме наносят еще две контрольные линии 2 (верхнюю и нижнюю контрольно-предупредительные границы), расположенные от центральной линии на расстоянии, исключающем выход значения контролируемого параметра за эти линии. Верхнюю и нижнюю контрольно-предупредительные границы располагают ближе к центральной линии, чем границы поля допуска. Ширина этой зоны имеет важное значение в деле профилактики брака. При слишком узкой зоне возрастает неоправданное вмешательство в производственный процесс, а при очень широкой ухудшается профилактика брака.

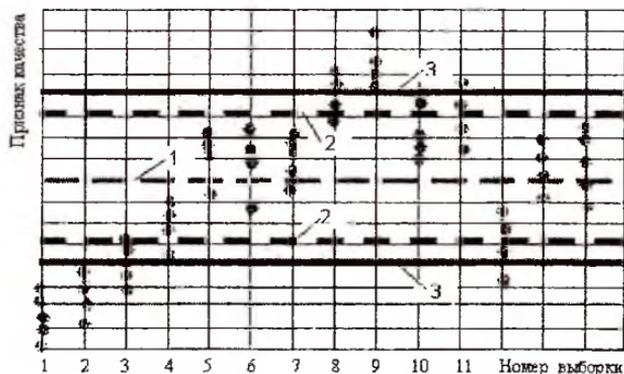


Рис. 11. Диаграмма изменения параметра качества

На диаграмме признаки качества наносятся в виде точек. Расстояние между крайними значениями точек в выборке характеризует рассеяние признака качества. Если точки не выходят за контрольно-предупредительные границы, то это означает, что технологический процесс идет без нарушений. Выход точек за линии технического допуска свидетельствует о возникновении брака из-за нарушения устойчивости технологического процесса и сигнализирует о необходимости принятия мер для его устранения. Когда ряд точек располагается по одну сторону от центральной линии, то можно предположить, что помимо случайных причин на изделие действуют и систематические факторы, своевременное обнаружение которых позволит предотвратить появление брака.

При построении точечной контрольной диаграммы используются следующие статистические характеристики [7]:

среднее значение \bar{X} и размах варьирования R значений параметра в выборках;

среднеквадратическое значение S и дисперсия σ^2 в выборке;

медиана Me и разброс R_{Σ} в выборке;

крайние значения x_{\min} и x_{\max} .

Размах R характеризует рассеяние параметра в выборке и точность технологического процесса и определяется разностью $R = x_{\max} - x_{\min}$,

где x_{\max} — максимальное значение параметра;

x_{\min} — минимальное значение параметра.

Применение величин R и σ позволяет значительно сократить объем вычислений.

Разбросом принято называть разность между медианой и крайними значениями измеряемого параметра выборки. Различают положительный R_+ и отрицательный R_- разбросы:

$$R_+ = x_{\max} - Me, \quad (32)$$

$$R_- = Me - x_{\min}, \quad (33)$$

$$R = R_+ + R_-. \quad (34)$$

В ряде случаев возникает задача получения более наглядных данных, характеризующих производственный процесс и дающих возможность построить кривую распределения параметров РЭС. Для решения этой задачи переходят к контролю методом средних выборок, при котором контролируются выборки от 25 до 50 изделий. При этом оказывается целесообразным построить так называемые частотно-точечные диаграммы (рис. 12) в которых по оси абсцисс откладываются признаки качества изделия. При этом наносят значения интервалов признака качества с таким расчетом, чтобы все результаты выборки измерений были представлены, а по оси ординат откладывают количество случаев попадания измеряемых параметров в одни и те же значения интервалов признака качества [5]. Количество точек в одном столбце характеризует частоту

ту появления измеряемого параметра в выборке. При построении частотно-точечных диаграмм важным является вопрос установления размерности шкалы оси абсцисс, т. е. масштаба оси абсцисс.

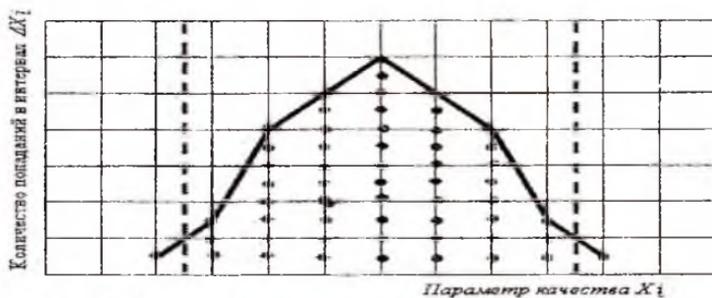


Рис. 12. Частотно-точечная диаграмма параметра качества

Оптимальной можно считать шкалу, масштаб которой определяется из следующего соотношения:

$$\Delta x_i = (3 \dots 10) \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{n}, \quad (35)$$

где n - объем выборки; значение коэффициента выбирается тем больше, чем больше n .

На частотно-точечных диаграммах наносятся также технические допуски и контрольно-предупредительные границы. Из диаграммы можно определить одну из характеристик положения закона распределения контролируемого параметра — моду.

5.1. Классификация методов испытаний

Применяемые в настоящее время методы испытаний можно классифицировать на следующие виды, показанные на рис. 13 [3].

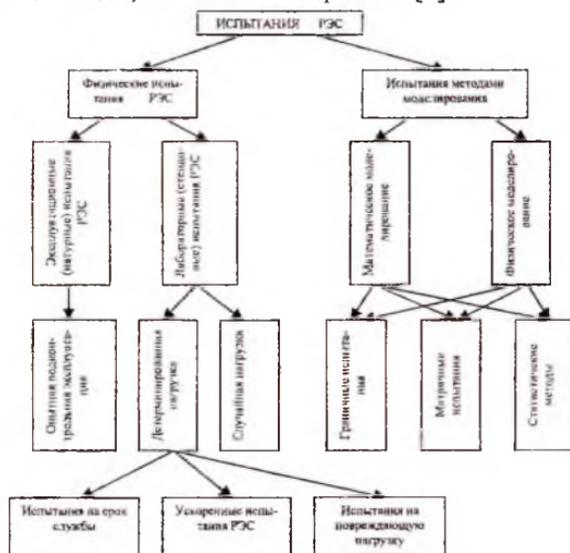


Рис. 13. Классификация методов испытаний

По принципам осуществления методы испытаний делятся на два больших класса: физические испытания РЭС или ее макетов; испытания методами моделирования. *Физические испытания* позволяют получить достаточно полную и достоверную информацию о свойствах РЭС в условиях значительной неопределенности ее внутреннего состояния, однако для проведения таких испытаний необходимы образцы РЭС или их макеты, большое время испытаний, дорогое оборудование для проведения испытаний. Испытания методами моделирования позволяют получить информацию о свойствах РЭС оперативно, при этом затраты средств невелики, однако для получения большой достоверности таких испытаний требуется большой объем информации о внутренних параметрах РЭС, что не всегда оказывается возможным.

При *испытаниях методами моделирования* различают физическое и математическое моделирование.

При *физическом моделировании* первичные параметры РЭС, процессы в их элементах или внешние воздействия заменяют простой физической моделью, имитирующей изменения конкретного параметра РЭС. Наиболее полную и достоверную информацию о надежности РЭС дают эксплуатационные (на-

турные) испытания. Этот вид испытаний представляет собой опытную подконтрольную эксплуатацию. При таких испытаниях РЭС эксплуатируются в реальных условиях, при которых на них действуют реальные случайные нагрузки в течение заданного времени эксплуатации.

Отличие этого вида испытаний от обычной эксплуатации в том, что периодически производятся измерения заданных параметров и проверка состояния РЭС. Основные недостатки таких испытаний заключаются в большой продолжительности испытаний и необходимости эксплуатации в реальных условиях.

Математическое моделирование обычно проводят с помощью АВМ или ЭВМ, что сокращает время испытаний и исключает их многократные повторения. Физическая модель РЭС отличается от самих РЭС только тем, что в ней предусматривается возможность изменять параметры элементов.

Как физические, так и математические методы моделирования могут быть статистическими, граничными или матричными.

Все виды испытаний и исследований, применяемые для предсказания места и времени появления постепенного отказа элемента или РЭС, основанные на определении связи граничных значений параметров элементов (факторов) с работоспособностью и надежностью РЭС, принято называть *граничными испытаниями*. Граничные испытания позволяют в процессе разработки выбирать варианты схем, параметры элементов, режимы работы. Граничные испытания состоят из трех этапов:

определение критериев отказа РЭС, исходя из требований технического задания и условий работы (в технических требованиях на РЭС обычно указываются допустимые предельные изменения выходных параметров Y_n и Y_v , которые определяют работоспособность РЭС. Аппаратура считается работоспособной, если выполняется условие работоспособности

$$Y_n < Y < Y_v \quad (36)$$

для всех выходных параметров);

определение границ изменения факторов, влияющих на работоспособность РЭС (напряжения питаний, внешние условия, параметры входных сигналов и т. д.), при которых РЭС сохраняют работоспособность;

определение границ изменения факторов (разброса параметров элементов) РЭС, при которых они остаются работоспособными в нормальных условиях. При граничных испытаниях изменяют факторы или имитируют изменение параметров РЭС (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивностей, электронных и полупроводниковых приборов), влияющих на работоспособность.

Граничные испытания представляют собой испытания модели РЭС, в результате которых можно получить область работоспособности РЭС в одномерном или двухмерном пространстве [3].

Проводятся граничные испытания следующим образом. В физической модели плавно или дискретно изменяется параметр какого-либо элемента (фактора) x_i . В процессе изменения контролируются значения выходных параметров Y_i . Устанавливаемые значения изменяемого параметра элемента (фактора) и соответствующее ему значение выходных параметров записываются в таблицу результатов.

Изменение параметра элемента x_i в ту и другую сторону от номинального значения производят до тех пор, пока не будет нарушено условие работоспособности (36) хотя бы по одному выходному параметру Y . По полученным данным, занесенным в таблицу результатов, строятся графики зависимостей $Y = f(x)$ (рис. 14), на которые накладываются предельные допустимые значения Y_n и $Y_в$. Через точки Y_n и $Y_в$ проводятся прямые параллельно оси x . Если из точек пересечения этих прямых с кривой $f(x)$ опустить перпендикуляры на ось x , то их пересечения с ней дадут x_{min} и x_{max} , определяющие область работоспособности в одномерном пространстве.

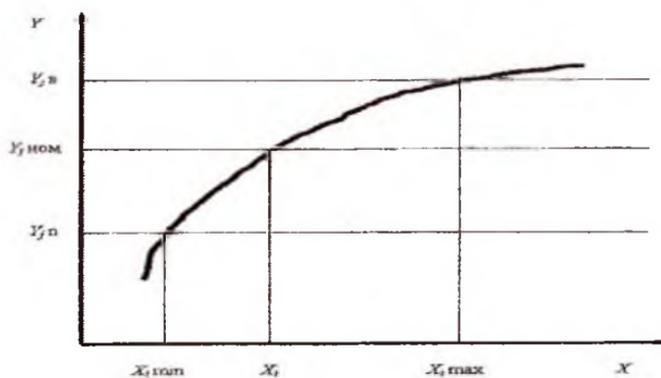


Рис. 14. Построение области работоспособности при одном изменяемом параметре

На практике часто в аппаратуре имеется два параметра, сильно влияющих на выходной параметр Y . В этом случае целесообразно построить область работоспособности в двухмерном пространстве (рис. 15).

Такие испытания осуществляются следующим образом:

выделяются параметры элементов x_1 и x_2 с наибольшими коэффициентами влияния;

задается какое-то дискретное значение параметру x_{11} и изменяется значение параметра x_2 в ту и другую сторону относительно X_2 до нарушения условия работоспособности;

фиксируются в таблице результатов значения x_{2i} , при которых условие работоспособности нарушилось. В ней же фиксируется значение x_{11} . Затем параметру x_1 задается новое значение x_{12} и вновь изменяется значение x_2 в ту и другую сторону от x_2 до нарушения условия работоспособности. Значения x_{22} , при которых произошло нарушение этого условия, и значение x_{12} также фиксируются в таблице результатов и т. д.

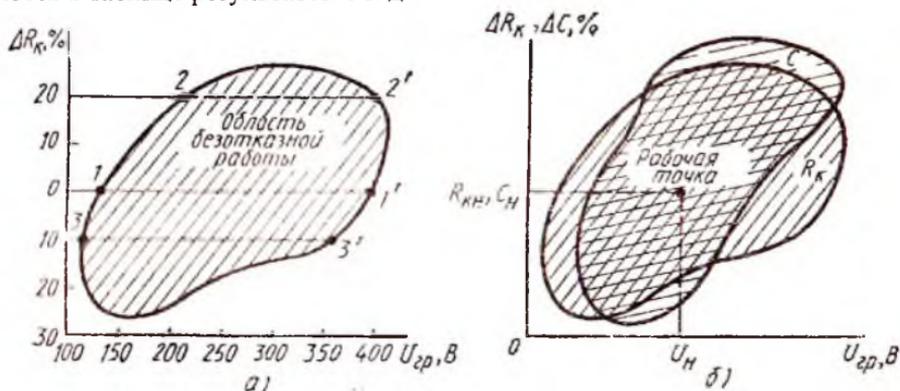


Рис. 15. Построение области работоспособности при двух (а) и трёх (б) изменяемых параметрах

Полученные сочетания значений x_1 и x_2 , при которых имело место нарушение условия (36), являются координатами точек границы области работоспособности. Эти точки откладываются на плоскости в системе координат x_1 и x_2 . Путем соединения точек строится область работоспособности ОР в двухмерном пространстве (см. рис. 15).

Исходя из знания области работоспособности, можно определить область допусков, которая должна вписываться в область работоспособности.

Однако граничным испытаниям присущ ряд недостатков. В первую очередь, это большая трудоемкость испытаний, необходимость иметь специальные автоматы для их проведения. Кроме того, при граничных испытаниях невозможна количественная оценка надежности, отсутствуют четкие правила по проведению испытаний и анализу полученных результатов.

Дальнейшим развитием метода граничных испытаний является метод матричных испытаний [5], заключающийся в том, что моделирование области работоспособности РЭС производится при изменении всех внутренних параметров. Для проведения матричных испытаний составляется матрица состояний

из m строк (по числу изменяемых внутренних параметров) и K столбцов (по числу дискретных значений — квантов, на которое разбиваются пределы изменения каждого внутреннего параметра):

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1k_1} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2k_2} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3k_3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mk_m} \end{pmatrix} \quad (37)$$

Состояние РЭС, при котором все внутренние параметры имеют определенное значение, отличающееся от других хотя бы одним квантом, называется *ситуацией*. С целью моделирования составляется матрица ситуаций. Число ситуаций определяется в общем случае выражением

$$N = \prod_{i=1}^m k_i, \quad (38)$$

а при одинаковом числе квантов и для всех факторов x

$$N = k^m. \quad (39)$$

Достоинством матричных испытаний является возможность получения информации о степени надежности РЭС и возможность оптимизации надежности. Недостатком матричных испытаний является очень большой объем испытаний и низкая точность определения вероятности безотказной работы изделия.

Метод статистических испытаний заключается в том, что при испытаниях этим методом осуществляется моделирование области работоспособности РЭС не при всех возможных значениях внутренних параметров, а только при наиболее вероятных, путем случайного перебора ситуаций по заданным случайным законам распределения внутренних параметров. Для проведения испытаний составляется матрица состояний с соответствующими каждому кванту вероятностями:

$$\begin{pmatrix}
 x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1k_1} \\
 P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1k_1} \\
 x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2k_2} \\
 P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & P_{2k_2} \\
 x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3k_3} \\
 P_{31} & P_{32} & P_{33} & \dots & P_{3k_3} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mk_m} \\
 P_{m1} & P_{m2} & P_{m3} & \dots & P_{mk_m}
 \end{pmatrix} \quad (40)$$

Затем производится случайный перебор ситуаций, при котором частота появления каждого кванта стремится к его вероятности при возрастании числа реализаций.

Достоинством статистических испытаний является возможность оценить с требуемой точностью и достоверностью надежность РЭС при ограниченном числе реализаций N . Для уменьшения трудоемкости можно перебирать не все ситуации, а часть из них, например по случайному закону. Тогда общее число испытаний может быть определено по формуле [5]

$$N_u = \frac{k-1}{\varepsilon^2} \cdot \ln \left(\frac{m \cdot k}{2 \cdot P_u} \right), \quad (41)$$

где ε — допустимая ошибка испытаний; $1 - P_u$ — достоверность испытаний.

5.2. Общая методология испытаний

5.2.1. Способы проведения испытаний

Испытания РЭС проводятся одним из четырех основных способов [3]: последовательным, параллельным, параллельно-последовательным, комбинированным.

При *последовательном способе* все отобранные для испытаний РЭС подвергаются поочередному раздельному воздействию различных внешних факто-

ров и производятся наблюдения за их состоянием. Очень важно соблюдать порядок чередования воздействующих факторов, который зависит от целей испытаний. Так, если одной из составляющих цели испытаний является выяснение свойств РЭС для как можно большего количества разновидностей факторов, то рекомендуется начинать испытания с менее жестких факторов, для которых вероятность отказов наименьшая. Внезапные отказы при этом незначительно задерживают испытания и мало увеличивают стоимость испытаний. Климатические испытания рекомендуется проводить после радиотехнических, электрических и механических испытаний. Если ставится задача наискорейшего выявления потенциально ненадежных изделий, то рекомендуется начинать испытания с более жестких факторов, для которых вероятность отказов наибольшая. Если же ставится задача выявить потенциальные свойства РЭС при работе в неблагоприятных условиях эксплуатации, то чередование воздействующих факторов должно быть таким, чтобы предыдущие воздействующие факторы усиливали эффект от воздействия последующих.

Преимуществом последовательного способа испытаний является высокая точность определения причин отказов, а недостатками — трудность оценки одновременного действия нескольких факторов и большая длительность испытаний, сопровождаемая большим износом РЭС.

При *параллельном способе* испытаний воздействию различных факторов подвергаются одновременно (параллельно) несколько изделий, выбранных для испытаний. Такой способ испытаний позволяет получить максимальное количество данных о состоянии РЭС за кратчайший промежуток времени при минимальном износе испытуемых образцов. Недостатком является необходимость в большем, чем при последовательном способе, количестве образцов РЭС для испытаний.

Для уменьшения времени проведения испытаний рекомендуется осуществлять их *параллельно-последовательным способом*. При этом отобранные для испытаний РЭС разбивают на несколько групп, которые испытывают параллельно. В каждой из групп испытания проводятся последовательным способом. В этом случае общая продолжительность испытаний меньше, чем при последовательном, а необходимое для испытаний количество испытуемых изделий меньше, чем при параллельном способе.

Комбинированный способ испытаний характеризуется одновременным воздействием нескольких внешних факторов на испытуемые РЭС. Он позволяет определить реакцию аппаратуры на одновременное действие нескольких внешних факторов, что максимально приближает испытания к реальным условиям эксплуатации [8]. Недостатком способа являются сложность определения при-

чины отказа и необходимость создания и использования сложного дорогого оборудования для испытаний контроля.

5.2.2. Разработка методики испытаний

Для каждого вида РЭС должна быть разработана своя методика испытаний.

Разработка методики состоит из следующих основных этапов [5].

Первый этап. На основании технических условий и программы испытаний, а также теории и данных экспериментов, полученных в процессе разработки РЭС с учетом действующих требований, норм и методов испытаний, необходимо определить:

каким способом будут осуществляться испытания;

с помощью каких технических средств будут воспроизводиться внешние воздействия;

как будет осуществляться контроль реакции РЭС на внешние воздействия и насколько точно будут контролироваться имитируемые условия окружающей среды;

каким способом будут осуществляться закрепление и монтаж испытуемых РЭС на стендах и в камерах.

В заключение первого этапа на основании действующей технической документации и рассмотренных выше мероприятий разрабатывается *проект методики испытаний*.

Второй этап. Пользуясь проектом методики, производят предварительные испытания, в ходе которых проверяется соответствие всего технического и контрольно-измерительного оборудования предъявляемым к нему требованиям. На основании полученных при этом данных уточняют методику испытаний и режимы всего испытательного оборудования.

Третий этап. Производится полное испытание РЭС в соответствии с разработанной методикой.

Четвертый этап. Обрабатываются и анализируются полученные данные, а также вносятся необходимые коррективы в методику испытаний. По окончании четвёртого этапа методика испытаний считается отработанной.

Основными вопросами, на которые должны быть даны ответы в методике испытаний при любом виде воздействий, являются следующие:

цель испытаний;

применяемое испытательное и контрольно-измерительное оборудование;

процесс проведения испытаний;

заклучение о состоянии испытываемых РЭС.

5.2.3. Операции процесса проведения испытаний

Технологический процесс испытаний РЭС состоит из ряда последовательных операций, основными из которых являются следующие:

1-я операция - предварительная выдержка РЭС в нормальных климатических условиях в течение заданного техническими условиями времени. Нормальные климатические условия характеризуются температурой 20 ± 5 °С, относительной влажностью 65 ± 15 %, атмосферным давлением 720...780 мм рт. ст.;

2-я операция - внешний осмотр РЭС и предварительные измерения их параметров, устанавливающие работоспособность РЭС;

3-я операция - проверка работоспособности испытательного оборудования, устройств измерения параметров РЭС, характеризующих их работоспособность;

4-я операция - установка испытуемого изделия в камеру или на стенд испытаний, механическое крепление, подведение к нему питающих напряжений, подключение измерительных приборов;

5-я операция - первоначальное измерение параметров, определяющее состояние РЭС до воздействия заданного фактора;

6-я операция - выдержка РЭС при воздействии на них определенных климатических, механических и других факторов для определения их влияния на свойства испытуемого изделия;

7-я операция - измерение параметров РЭС для определения их состояния в процессе воздействия заданного фактора заданной величины;

8-я операция – выдержка испытуемого изделия в нормальных условиях, проведение внешнего осмотра РЭС и заключительные измерения, проводимые по окончании испытаний (в камере или вне ее), с целью установления количественных и качественных изменений характеристик РЭС от воздействия заданного фактора. Оценка влияния воздействия заданного фактора производится путем сравнения результатов заключительных измерений с результатами первоначальных, а также с допустимыми пределами для каждого параметра. Если все параметры РЭС, характеризующие их работоспособность, не выходят за установленные пределы, то считают, что РЭС обладают *стойкостью* при воздействии на них заданного фактора заданной величины в течение заданного времени.

Первые пять операций являются общими и имеют место для любого вида испытаний. Основной целью их проведения является исключение ошибок из результатов испытаний, которые обусловлены следующими возможными причинами:

попадание на испытания бракованных РЭС;
проведение испытаний на неисправном испытательном оборудовании;
проведение контроля испытательных режимов неисправными контрольно-измерительными приборами;
нарушение работоспособности аппаратуры в процессе установки ее на стенде, подключения внешней аппаратуры.

Общей для всех видов испытаний является также и восьмая операция, которая служит для оценки результатов испытаний. В то же время содержание шестой и седьмой операции, а также методика их проведения зависят от вида испытаний. Параметры РЭС, измеренные в седьмой операции, после сравнения с допустимыми пределами позволяют определить *устойчивость* РЭС к заданному воздействию. Так, если все параметры РЭС, характеризующие их работоспособность, не выходят за заданные границы при воздействии заданного фактора в заданных пределах, то считается, что РЭС *устойчивы* к заданному воздействию.

Немаловажным для получения достоверной информации при испытании РЭС является правильный выбор испытательного оборудования, которое должно обеспечивать проведение испытаний в соответствии с требованиями технических условий на аппаратуру, программы и методики испытаний. В оборудовании должна быть предусмотрена возможность установления заданных параметров режимов, их измерение, регулировка. Желательно, чтобы оно позволяло вести автоматическую запись и программное управление режимами испытаний, имело счетчики наработки РЭС в процессе испытаний.

Оборудование должно иметь электроды, обеспечивающие подачу питающих напряжений и испытательных сигналов на проверяемую аппаратуру, а также измерение ее электрических параметров. Уровень электрических и магнитных помех, шумов, создаваемых оборудованием, не должен превышать санитарно-технические нормы и быть по возможности минимальным. В оборудовании должны быть предусмотрены световая и звуковая сигнализация его исправности, а также аварийная предельная сигнализация отключения оборудования. Высоковольтные цепи оборудования должны иметь автоблокировку от несанкционированного вмешательства персонала.

6. ИСПЫТАНИЯ РЭС НА НАДЕЖНОСТЬ

6.1. Показатели надёжности

Под надежностью понимается свойство РЭС выполнять заданные функции, сохраняя в течение заданного времени установленные эксплуатационные параметры в пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования. Надежность как свойство закладывается в изделие в процессе его проектирования и изготовления. Для количественной оценки уровня надежности служит ряд следующих показателей:

вероятность безотказной работы $P(t)$;

вероятность отказа $Q(t)$;

интенсивность отказа $\lambda(t)$;

средняя наработка до первого отказа T_0 ;

среднее время безотказной работы T_{cp} ;

долговечность (технический ресурс) T_0 ;

срок службы $T_{ср}$;

срок сохраняемости $T_{ф}$.

Рассмотрим более подробно некоторые из этих характеристик [4].

Под вероятностью безотказной работы $P(t)$ понимается вероятность того, что изделие будет выполнять заданные функции и сохранять параметры в установленных пределах в течение заданного времени и при определенных условиях эксплуатации. Практически вероятность безотказной работы за заданный промежуток времени t можно определить по результатам наблюдений за выборкой как отношение числа изделий, оставшихся исправными в конце рассматриваемого интервала времени t , к начальному числу изделий n , поставленных на испытания, т. е.

$$P_u(t) = \frac{n - d(t)}{n}, \quad (42)$$

где $d(t)$ — число отказавших изделий.

При стремлении числа изделий в выборке n к числу изделий генеральной совокупности N величина $P_u(t)$ стремится к $P(t)$. На рис. 16 приведена зависимость вероятности безотказной работы изделия во времени. Площадь, ограниченная кривой $P(t)$ и осью абсцисс, равна средней наработке безотказной работы изделия T_{cp} , а производная $P(t)$ по времени является плотностью вероятности безотказной работы $f(t)$.

Соответственно вероятность отказа определяется из выражения

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (43)$$

Известно, что интенсивность отказов $\lambda(t)$ показывает долю исправных в данный момент времени изделий в выборке, отказавших в единицу времени. Экспериментально в результате соответствующих испытаний эта величина определяется по формуле

$$\lambda_n = \frac{\Delta d(t)}{(n - d(t)) \cdot \Delta t}, \quad (44)$$

где $d(t)$ — число изделий, отказавших к началу интервала Δt ; $\Delta d(t)$ — число отказавших изделий в течение времени Δt .

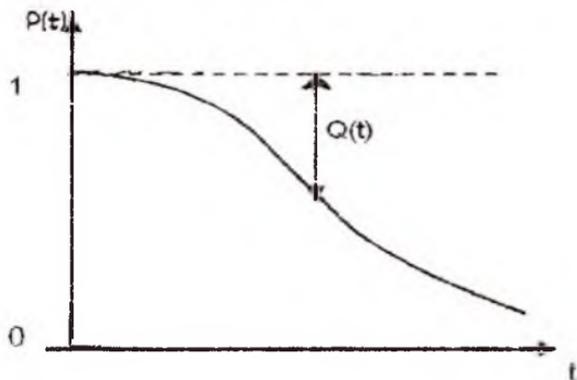


Рис. 16. Зависимость вероятности безотказной работы РЭС от времени эксплуатации

Если определить $\lambda_u(t)$ для различных значений t и построить график, то получится зависимость интенсивности отказов $\lambda(t)$ от времени (рис. 17). Эту функцию часто называют лямбда - характеристикой.

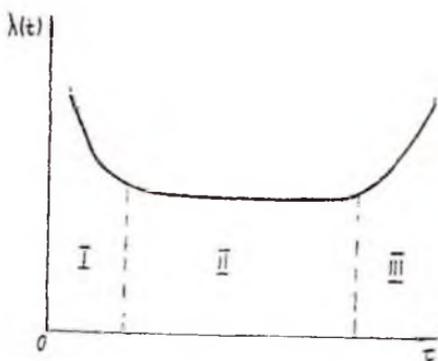


Рис. 17. Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации

Она имеет три характерные области: I — характеризуется высокой интенсивностью отказов и обусловлена скрытыми дефектами, которые не удалось

искрыть в процессе изготовления; II — рабочая область; III — характеризуется возрастанием интенсивности отказов за счет износа и старения.

Между величинами $\lambda(t)$ и $P(t)$ существует взаимосвязь, которая определяется следующими формулами:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} f(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} \quad (45)$$

где $f(t) = \frac{dP(t)}{dt}$ — плотность вероятности безотказной работы изделия.

Из соотношения (45) следует, что

$$P(T) = e^{-\int_0^T \lambda(t) dt} \quad (46)$$

Под долговечностью T_d понимается наработка РЭС (время, в течение которого изделие находилось во включённом состоянии) от начала эксплуатации до наступления предельного состояния, когда дальнейшая эксплуатация прекращается из-за неустранимого ухода параметров или снижения эффективности эксплуатации.

Под сроком службы $T_{сл}$ изделия понимается календарная продолжительность эксплуатации РЭС от начала их эксплуатации до наступления предельного состояния РЭС.

Под сроком сохраняемости понимается календарная продолжительность хранения РЭС в заданных условиях, при которых показатели надежности остаются в заданных пределах.

Надежность изделия определяется в первую очередь надежностью элементов, из которых оно состоит. Выходные параметры РЭС, которые можно рассматривать как m -мерный вектор

$$Y = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_b, \dots, Y_m), \quad (47)$$

связаны с внутренними параметрами, которые можно рассматривать как k -мерный вектор

$$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_j, \dots, x_k), \quad (48)$$

определенной функциональной связью

$$Y = F(X). \quad (49)$$

Под внутренними параметрами в этом случае понимаются значения параметров элементов схемы (емкость конденсатора, сопротивление резистора и т.п.), значения питающих напряжений и входных сигналов и т.п.

Объективные эксплуатационные факторы, воздействия на РЭС приводят к изменению внутренних параметров X , которые в силу условия (43) приводят к изменению выходных параметров Y .

Для практического использования статистических оценок параметров надежности применяются следующие методы испытаний:

с ограниченной продолжительностью без замены отказавших изделий (ГОСТ 18333-73);

с ограниченной продолжительностью и заменой отказавших изделий (ГОСТ 18049-72);

с ограниченным числом отказов (ГОСТ 17572-72);
последовательный (ГОСТ 17331-71).

Рассмотрим несколько подробнее эти методы испытаний.

Испытания на надежность ограниченной продолжительности без замены отказавших изделий проводят для проверки соответствия уровня надежности изделий заданному. Таким испытаниям могут подвергаться невосстанавливаемые изделия, а также восстанавливаемые, если по условиям испытаний они после первого отказа не восстанавливаются и не заменяются новыми. При этом ограничение длительности испытаний t_u вызвано соображениями организационного или служебного характера. Оценка этим методом производится по числу отказов d , возникших за время испытаний t_u .

Исходными данными для составления и расчета плана испытаний являются значения риска поставщика α и потребителя β , приемочного $T_{пр}$ и браковочного $T_{бр}$ чисел, средней наработки до первого отказа T_0 , объема выборки n и продолжительности испытаний t_u .

Значения риска поставщика α и потребителя β выбирают в зависимости от специфики изделий, возможностей производства, требований потребителя и особенностей функционирования изделий, исходя из экономических соображений. Испытания должны прекращаться до истечения заданного времени испытаний t_u , если число отказов становится равным или превышает значения $d_{пред}$, указанные в специальных таблицах [3].

План данных испытаний будет следующим:

1) для установленных значений $T_{пр}$ и $T_{бр}$, определяется отношение $T_{бр} / T_{пр}$;

2) для заданного t_u определяется отношение t_u / T_0 и по таблицам χ^2 — распределения для вычисленного отношения $T_{бр} / T_{пр}$ и заданных значений риска поставщика α и потребителя β находится объем выборки n' и браковочное число $d_{пред}$;

3) для заданных значений риска поставщика α и потребителя β , n' и вычисленного $T_{бр} / T_{пр}$ по той же таблице определяется значение n , близкое к n' . Умножив значение n на T_0 , получают t_u . Партия изделий считается принятой, если за время t_u число отказавших изделий меньше $d_{пред}$.

Цель второго метода испытаний аналогична цели вышерассмотренного метода. Планирование и оценка результатов испытаний производится по наработке на отказ T_0 . Значения α , β , T_{np} , $T_{бр}$ согласуются между заказчиком, разработчиком и изготовителем и указываются в технической документации. Испытания прекращают в заранее установленный предельный момент времени t_u или в момент возникновения последнего из установленного количества отказов $d_{пред}$, если число этих отказов достигнуто раньше. Замена отказавших изделий новыми производится в момент отказа изделия.

План испытаний для второго метода будет следующим:

- 1) для заданных значений T_{np} и $T_{бр}$ определяется отношение $T_{бр} / T_{np}$;
- 2) по таблице χ^2 -распределения для заданных α и β определяем число, ближайшее к $T_{бр} / T_{np}$. По найденному числу определяют код плана испытаний, значения $d_{пред}$ и t_{Σ} / T_0 , где t_{Σ} — суммарная наработка изделий, поставленных на испытания;
- 3) объем выборки n определяют из выражения

$$n = \frac{t_{\Sigma}}{\frac{T_0}{\frac{t_{пред}}{T}}}. \quad (50)$$

Испытания заканчиваются при $t_u = t_{пред}$, если за это время $d < d_{пред}$, при этом партия принимается. Либо испытания заканчиваются при $d = d_{пред}$ за $t_u = t_{пред}$, но при этом партия бракуется.

Отличительной особенностью третьего метода испытаний является прекращение их только в момент возникновения последнего из заданного числа отказов, которое находится по специальным таблицам на основании исходных данных.

План испытаний в данном случае выглядит следующим образом:

- 1) для заданных значений T_{np} и $T_{бр}$ определяется отношение $T_{бр} / T_{np}$;
 - 2) для заданных α и β по таблицам χ^2 -распределения определяются число, ближайшее к отношению $T_{бр} / T_{np}$ и код плана испытаний;
 - 3) по коду плана испытаний определяют предельное число отказов $d_{пред}$ и значение отношения α / T_0 ;
 - 4) при испытаниях без восстановления и замены отказавших изделий новым объем выборки n должен быть не менее $d_{пред}$;
 - 5) при испытаниях с восстановлением или заменой n может быть любым.
- Затем после испытаний проводятся следующие расчеты [7].
 Определяется суммарная наработка t_{Σ} изделий.

При испытаниях без восстановления и замены t_{Σ} вычисляется по отношению суммарной наработки изделий в данный момент времени t к значению T_0 , а сумма отрезков, параллельных оси r , равна числу отказов изделий к моменту времени испытаний. При отсутствии отказов график представляется прямой линией с началом в точке O и концом на оси t_{Σ}/T_0 длиной $t_{\Sigma} = nt$.

При испытаниях с восстановлением

$$t_{\Sigma} = n \cdot t - \sum_{j=1}^n t_{jв}, \quad (51)$$

где $t_{jв}$ — длительность восстановления работоспособности для отказавших изделий.

При испытаниях без восстановления

$$t_{\Sigma} = (n - r)t - \sum_{j=1}^n t_{j}, \quad (52)$$

где t_j — наработка от отказа j -го из r отказавших изделий. Испытания заканчиваются положительно, если график (рис. 18) последних испытаний достигает линии II, когда $t_{\Sigma} > t_{\Sigma пр}$ изделия считаются принятыми. Кроме того, испытания заканчиваются положительно, если $r < r_{усеч}$ и $t_{\Sigma} > t_{\Sigma усеч}$ (линия IV).

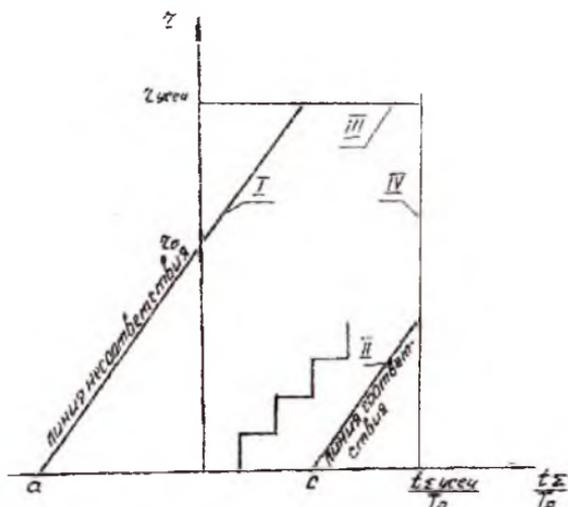


Рис. 18. Зависимость числа отказавших элементов от времени наработки

Испытания заканчиваются отрицательно, если график достигает линии несоответствия I, т. е. когда $t_{\Sigma} > t_{\Sigma усеч}$, или если график достигает отрезка III, т. е. когда $r = r_{усеч}$ и $t_{\Sigma} < t_{\Sigma усеч}$.

6.2. Выбор нагрузки при испытаниях

Любая аппаратура подвергается самым различным нагрузкам. Это и механические воздействия в виде вибраций, ударов, тряски, электрические, температурные и климатические воздействия [4]. Каждое изделие характеризуется определенной прочностью, т. е. способностью сопротивляться воздействию внешних сил, не разрушаясь при этом и не получая остаточных деформаций. Предельное значение нагрузки, устанавливаемое для всей генеральной совокупности, берется равным предельной нагрузке того изделия, которое имеет наименьшую прочность. Прочность со временем изменяется в основном из-за старения и износа, которые, в свою очередь, зависят от нагрузки. Нагрузка, выбранная с соответствующим запасом и рекомендованная потребителю, называется *предельно допустимой*. Запас прочности выбирается изготовителем с тем, чтобы гарантировать показатели надежности РЭС. Так как эти показатели зависят от многих факторов (нагрузок), то предельно допустимая нагрузка устанавливается экспериментально. Следует иметь в виду, что слишком большой запас при установлении предела надежности уменьшает эффективность применения РЭС.

6.3. Испытания на повреждающую нагрузку

Целью проведения испытаний на повреждающую нагрузку является оценка стойкости элементов всей РЭС к внешним воздействиям. Эти испытания дают сведения о возможности использования элементов РЭС при определенной нагрузке, однако определить характеристики надежности нельзя, хотя известно, что вероятность безотказной работы зависит от запаса прочности (рис. 19).

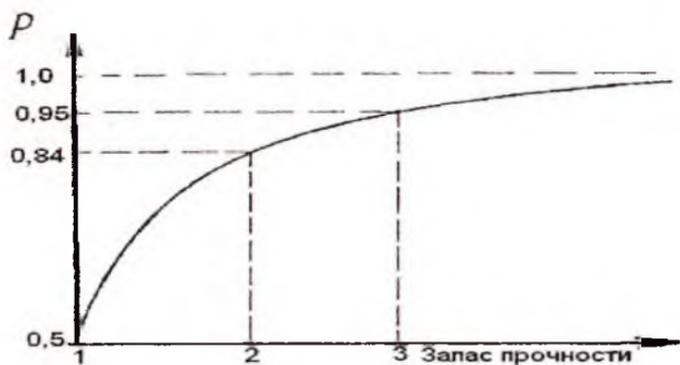


Рис. 19. Зависимость вероятности безотказной работы от запаса прочности

В процессе испытаний внешнее воздействие (нагрузки) увеличивается постепенно до момента возникновения отказа, а значение нагрузки фиксируется как в процессе увеличения ее, так и в момент отказа РЭС. Эмпирически уста-

новлено, что испытания следует прекратить, если РЭС выдерживают четырехкратное превышение допустимого значения нагрузки. Время безотказной работы во время испытаний не фиксируется, причем стараются его по возможности уменьшить. Таким испытаниям подвергают аппаратуру однократного или кратковременного действия. Нагрузки могут быть одиночными и комплексными, однако повреждающая нагрузка должна быть одной при постоянстве на нормальном уровне всех других.

Для удобства повреждающая нагрузка увеличивается скачками (рис. 20) с выдержкой по времени Δt , зависящей от характера нагрузки [5].

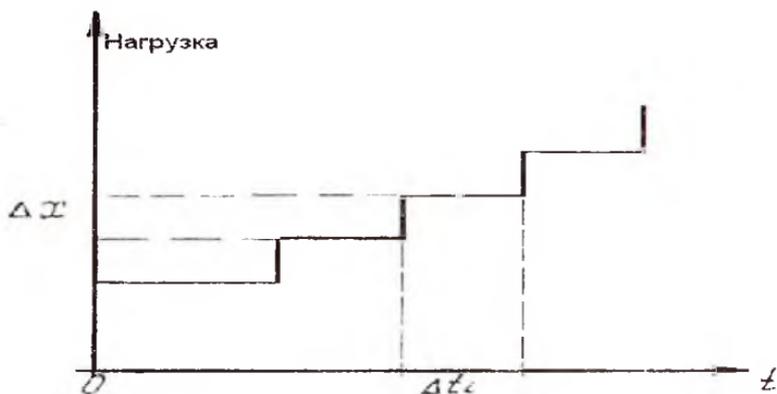


Рис. 20. Зависимость изменения нагрузки во времени

Значения скачка ΔX выбирают большими, но не настолько, чтобы значительно увеличить ошибку определения надежности. По результатам испытаний строят гистограмму, в которой за начало отсчета принимают нагрузку, соответствующую максимальной вероятности отказов.

6.4. Испытание РЭС на длительность хранения (сохраняемость)

При испытаниях на длительность хранения изделия размещают в упаковке предприятия изготовителя. Обычно такие испытания проводят в условиях отапливаемого склада, в ряде случаев под навесом (испытания в полевых условиях более жесткие).

Параметры критериев годности изделий должны оставаться в пределах норм нормативно-технической документации (НТД) в течение всего срока хранения.

Целью испытаний является:

проверка изделий на сохранность, установленную в НТД;

накопление информации о техническом ресурсе сохраняемости;

разработка рекомендаций по увеличению сохраняемости;
уточнение норм на показатели сохраняемости.

Критерием оценки сохраняемости изделий является гамма - процентный срок сохраняемости γ_c [4].

Этот срок определяется временем хранения, при котором вероятность безотказной работы изделий достигает заданной величины γ_c - процентов (рис. 21). На испытания закладывается выборка не единовременная, а постепенная ежквартальная в течение двух лет. Перед началом испытаний выборку выдерживают в нормальных климатических условиях: $T = 20 \pm 5^\circ\text{C}$, отн. вл. 45...80 %.

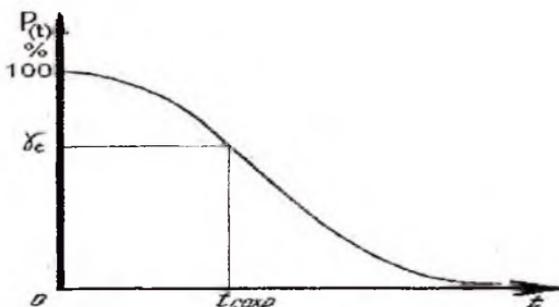


Рис. 21. Зависимость вероятности безотказной работы от времени хранения

Приборы нумеруют, осматривают и проводят первоначальные измерения параметров годности. Неисправные изделия заменяют исправными, замена не учитывается.

К каждой выборке прилагается сопроводительный документ, включающий в себя следующие сведения: наименование изделия, количество изделий в выборке, условия и длительность испытаний, предприятие - изготовитель, период изготовления, измеряемые параметры, отметка об очередной проверке.

Изделия, которые в процессе хранения перестали соответствовать нормам, оставляют для дальнейшего хранения с целью определения размера отклонения параметров в течение всего срока хранения. Если изделие полностью отказало, то его снимают с испытаний для выявления причин отказа. Экспериментальное значение γ_c - процентного срока хранения определяется по формуле

$$\lambda_c = \left(1 - \frac{d}{n}\right) 100\%, \quad (53)$$

где d — число отказов за время хранения;

n — объем выборки.

Если γ_c больше значения, указанного в технических условиях, то результаты испытаний считаются положительными. Испытания могут быть продолжены для выявления фактического времени сохраняемости.

6.5. Прогнозирование надежности РЭС

При проектировании и производстве РЭС очень важно прогнозировать их техническое состояние и надежность.

На стадии проектирования целями прогнозирования являются:

разработка конструкции, наилучшим образом удовлетворяющей по надежности условиям работы;

выбор технологических режимов;

определение требований по надежности.

На стадии производства прогнозирование служит управлению технологическим процессом, отбраковке ненадежных изделий на отдельных операциях, оценке и контролю надежности готовой продукции.

На стадии эксплуатации целью прогнозирования является своевременное предупреждение отказов и применение таких условий эксплуатации, которые бы обеспечивали заданную надежность и эффективность.

Если в результате прогнозирования получают предполагаемое значение параметров в будущие моменты времени, то такое прогнозирование называется *прямым*. Если же в результате получают *момент времени* выхода параметра за допустимые пределы, то прогнозирование называют *обратным* (рис. 22).

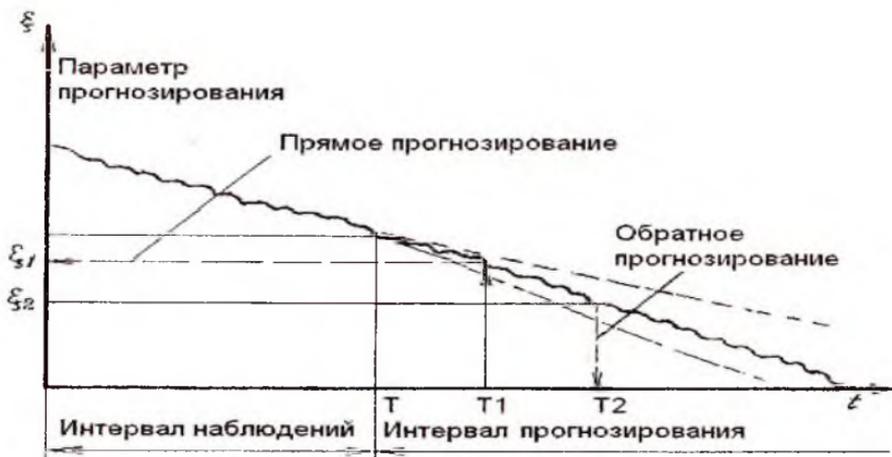


Рис. 22. Изменение параметра РЭС в течение времени

Существует много различных методов прогнозирования, которые можно сгруппировать в математические, физические и физико-статистические [2,5].

Математическое прогнозирование ставит целью определение характера протекания процесса в РЭС в будущем на основании найденных экстраполяционных связей с информацией о процессе в контролируемом периоде времени. Точность прогнозирования зависит от точности описания связей. Чем большее влияние на параметры РЭС оказывают случайные факторы, тем хуже прогноз, соответственно, чем большее значение имеют систематические факторы, тем прогноз точнее. Для построения экстраполяционной зависимости необходимо иметь графическую зависимость изменения прогнозируемого параметра во времени. Если на параметр влияет несколько факторов, то необходимо определить градиент вектора параметра РЭС. Этот метод используется в основном при прогнозировании параметров РЭС, изменяющихся по закону, близкому к линейному. При вероятностном подходе к экстраполяционной зависимости учитывают изменения математического ожидания и дисперсии выходной величины.

Физические методы прогнозирования надежности (причинные) основаны на анализе физических и физико-химических процессов. Процессы износа локализованы и зависят от конкретных причин, поэтому моделью надежности РЭС может служить модель, основанная на суммировании компонентов ненадежности. Компонентами ненадежности считают составные элементы изделия. Их выделяют так, чтобы они обладали технологической независимостью. Изучение и моделирование кинетики процессов в выделенных компонентах ненадежности позволяет установить причинную связь между геометрией компонентов, свойствами материалов, эксплуатационными факторами и временем наработки изделия до отказа. В компоненте могут действовать несколько механизмов отказа, которые рассматривать следует отдельно.

Физико-статистический метод прогнозирования надежности заключается в отыскании корреляционных зависимостей между статистическими показателями надежности и явлениями, локализованными в различных конструктивно - технологических областях РЭС. Модели строят на основе анализа физико-химических процессов в элементах РЭС и результатов специальных испытаний, называемых *ускоренными испытаниями*, при которых физико-химические процессы, приводящие к отказам, ускоряются за счет повышения уровня воздействующих внешних факторов (температур, напряжений, токов, вибраций и т. д.). При ускоренных испытаниях изделия испытывают в форсированных режимах с последующей экстраполяцией результатов испытаний к

условиям испытаний при нормальных нагрузках. Физический смысл ускоренных испытаний заключается в ускорении только того механизма отказов, который является характерным для испытываемых РЭС при работе под номинальной нагрузкой. При этом следует сохранять неизменным механизм отказов, что является самым трудным, т. к. выявить сам механизм отказа очень сложно.

6.6. Статистическая оценка законов распределения численных показателей надежности

Для решения теоретических и практических задач надежности необходимо знать законы распределения численных показателей надежности. Получить их можно путем обобщения большого статистического материала, полученного в процессе испытаний на надежность. Наглядное представление о законах распределения дают статистические графики, наиболее распространенными из которых являются полигон, гистограмма, статистическая функция распределения. Статистические графики, построенные на основании ограниченного числа экспериментальных данных, изображаются в виде ломаной кривой, которая тем больше приближается к теоретической, чем больше количество опытов в эксперименте.

Полигон строится следующим образом: на оси абсцисс откладываются интервалы значений величины, в серединах интервалов строятся ординаты, пропорциональные частотам, и концы ординат соединяются (рис. 23) [7].



Рис. 23. Построение полигона и гистограммы по результатам экспериментальных данных

Гистограмма (полигон частот) строится так. Над каждым отрезком оси абсцисс, изображающим интервал значений величины, строится прямоугольник, площадь которого пропорциональна частоте в этом интервале. Если все

интервалы имеют одинаковую ширину, то высота прямоугольника также пропорциональна частотам. Из построения гистограммы следует, что полная ее площадь равна единице. При увеличении числа опытов N_0 для каждого интервала можно брать все меньшую продолжительность. При этом гистограмма будет приближаться к некоторой плавной кривой. Такая кривая соответствует графику плотности распределения случайной величины. Следовательно, в результате построения гистограммы можно получить представление о дифференциальном законе распределения случайной величины и установить вид функции плотности распределения.

Статистическая функция распределения (*полигон накопленных частот*) строится следующим образом. Над каждым отрезком, изображающим начало и конец интервала, проводится горизонтальная линия на уровне ординаты, равной величине накопленной частоты. Концы горизонтальных отрезков соединяются вертикальными линиями. Статистическая функция распределения $F^*(t)$ представляет собой частоту событий $T < t$ в данной выборке:

$$F^*(t) = P^*(T < t), \quad (54)$$

где P^* — частота или статистическая вероятность события. При неограниченном увеличении числа опытов, согласно теореме Бернулли, при любом t частота событий $P^*(T < t)$ приближается (сходится по вероятности) к вероятности этого события.

Если T — непрерывная величина, то при увеличении числа опытов число скачков функции $P^*(t)$ увеличивается, величина скачков уменьшается и график функции $F^*(t)$ приближается к плавной кривой $F(t)$ — интегральной функции распределения величины T или к вероятности отказа $q(t)$ (см. рис. 23).

Для определения теоретического закона распределения производится так называемое *выравнивание статистического ряда*. Под ним подразумевается такая обработка статистических данных, при которой обеспечивается подбор наиболее подходящего теоретического закона распределения. При этом закон распределения может быть задан либо функцией распределения $F(t)$, либо плотностью распределения $f(t)$.

Для оценки степени расхождения полученного статистического распределения $F^*(t)$ с теоретическим $F(t)$ существуют различные критерии. Из множества критериев выбирается мера расхождения, по значению которой можно судить о том, вызвано ли расхождение случайными причинами или разница между ними настолько велика, что выбранный теоретический закон $F(t)$ непригоден.

Сущность применения критериев согласия заключается в следующем. Предполагается, что случайная величина T , полученная в виде статистического ряда, подчинена некоторому определенному закону распределения, описываемому функцией $F(t)$. Для проверки справедливости такой гипотезы вводится вспомогательная величина Δ , которая может быть выбрана разными способами, но так, чтобы она могла служить мерой расхождения между теоретическим законом распределения и статистическим распределением, полученным при проведении испытаний.

Наиболее употребляемыми критериями согласия являются критерии χ^2 Пирсона и критерий А.Н. Колмогорова. В качестве меры расхождения Δ для критерия χ^2 выбрана величина, определяемая выражением

$$\chi^2 = \Delta_n = \sum_{j=1}^k \frac{(P_j^* - P_j)^2}{P_j} = \sum_{j=1}^k \frac{(N_j - N_0 \cdot P_j)^2}{N_0 \cdot P_j}, \quad (55)$$

где N_0 — общее число опытов,

k — число интервалов статистического ряда.

$P_j^* = n_j / N_0$ — частота j -го интервала статистического ряда,

P_j — теоретическая вероятность попадания случайной величины в j и интервал. Она определяется выражением

$$P_j = \int_t^{t+\Delta} f(t) dt. \quad (56)$$

Определив величину расхождения Δ , находят вероятность события P ($\Delta > \chi^2$). Определяется эта вероятность по специальным таблицам. Если вероятность очень мала ($< 0,1$), то выбранное теоретическое распределение следует считать неудачным. При относительно большом значении вероятности P ($\Delta > \chi^2$) выбранное теоретическое распределение можно признать не противоречащим опытными данным.

Критерий согласия Колмогорова отличается своей простотой. Сущность применения его сводится к следующему. На график наносят значения функции распределения и выбранной аппроксимирующей функции $F(t)$. За меру расхождения между ними выбирается величина $D \cdot \sqrt{N_0}$, где D определяется графически как

$$D = \max |F(t) - F^*(t)|. \quad (57)$$

Затем по таблице находится значение вероятности $P(D\sqrt{N_0} \geq \lambda)$. Если окажется, что $P(D\sqrt{N_0} \geq \lambda) > 0,25$, то функцию $F(t)$ принимают за рабочую гипотезу, если $P(D\sqrt{N_0} \geq \lambda) < 0,05$, функцию $F(t)$ отвергают. Следует отме-

т.е., что применение критерия Колмогорова ограничено требованием предварительного знания параметров для $F(t)$.

Для того чтобы найти закон распределения случайной величины, необходимо провести сравнительно большое число опытов N_0 . На практике чаще всего приходится иметь дело со статистическим материалом весьма ограниченного объема, который оказывается недостаточным, чтобы определить закон распределения случайной величины численного показателя надежности. Однако такой материал может быть подвергнут статистической обработке, позволяющей получить некоторые сведения о случайной величине T путем ориентировочной оценки ее числовых характеристик. Любое значение искомого параметра, вычисленное на основе ограниченного числа опытов, называется *оценкой параметра*.

Существуют соответствующие правила и методы наилучшей статистической обработки опытных данных для достоверной оценки неизвестных значений параметров с требуемой точностью и достоверностью.

Если в процессе испытаний получают некоторый статистический ряд $T = t_1, t_2, t_3, \dots, t_j, \dots, t_n$, то, располагая им, можно найти некоторую величину T_{CP}^* , являющуюся функцией N_0 случайных реализаций t_j . Величину T_{CP}^* называют *статистической оценкой* T_{CP} , полагая, что $T_{CP}^* \approx T$. Справедливость этого приближенного равенства будет тем более обоснованной, чем больше объем статистики N_0 и чем лучше подобрана функция T_{CP}^* . Возможность применения T_{CP}^* для приближенного определения среднего времени до отказа базируется на положении теории вероятностей, согласно которой среднее арифметическое значений случайной величины является состоятельной и несмещенной оценкой математического ожидания. *Состоятельность* оценки заключается в том, что при увеличении числа опытов T_{CP}^* она приближается (сходится по вероятности) к истинному значению математического ожидания. *Несмещенность* оценки выражается в том, что при использовании среднего арифметического значения не делается систематической ошибки в сторону завышения или занижения.

Таким образом, использованные в качестве оценки при ограниченном числе опытов величины T_{CP}^* позволяют свести неизбежные ошибки при определении T_{CP} к минимально возможным. Задача заключается в том, чтобы определить, насколько эти неизбежные ошибки влияют на точность и достоверность вычисленных значений T_{CP} , т. е. если в качестве оценки параметра T_{CP} принимается среднее арифметическое значений T_{CP}^* , то надлежит установить, с какой

вероятностью можно утверждать, что допущенная при этом ошибка не превысит некоторой наперед заданной величины ϵ .

Решение этой задачи сводится к нахождению вероятности того, что истинное неизвестное значение параметра T_{cp} будет заключено в пределах $T_{cp}^* - \epsilon < T_{cp} < T_{cp}^* + \epsilon$. Обозначим эту вероятность через γ (гамму), тогда

$$\gamma = P[(T_{cp}^* - \epsilon) < T_{cp} < T_{cp}^* + \epsilon], \text{ или } \gamma = P[|T_{cp}^* - T_{cp}| < \epsilon]. \quad (58)$$

Вероятность γ принято называть *доверительной вероятностью*. Это вероятность того, что ошибка от замены T_{cp} его оценкой T_{cp}^* не превышает по абсолютной величине некоторого произвольного числа ϵ . Или, по-другому говоря, γ есть вероятность того, что случайный интервал $I_\gamma[T_{cp}^* - \epsilon, (T_{cp}^* + \epsilon)]$ накроет точку T_{cp} . Этот интервал называется *доверительным интервалом*, т. е. $I_\gamma = T_{cp}^* \pm \epsilon$. Границы интервала $T_{cp1} = T_{cp}^* - \epsilon$ и $T_{cp2} = T_{cp}^* + \epsilon$ называются *доверительными границами*.

Доверительный интервал характеризует *точность* полученного результата, а доверительная вероятность — его *достоверность*. Располагая зависимостью доверительной вероятности γ от задаваемой точности оценки ϵ , можно определить с помощью таблиц или графиков-номограмм статистическую оценку параметра T_{cp} для различных чисел N_0 испытуемых РЭС (рис. 24).

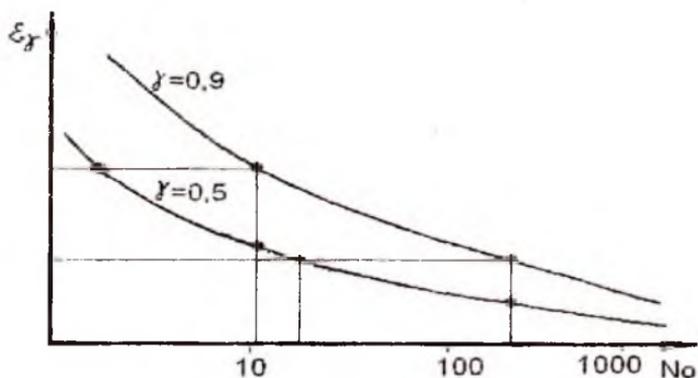


Рис. 24. Зависимость точности оценки от числа испытаний

6.7. Ускоренные испытания РЭС

Методами математической статистики можно установить допустимые пределы изменения нагрузок, при которых механизмы отказов остаются неизменными. Если закон распределения вероятности безотказной работы РЭС не изменяется для номинальной и форсированной нагрузки, то считают, что механизм отказов неизменен и тогда можно экстраполировать результаты ускоренных испытаний к нормальным условиям.

Термическая нагрузка наиболее изучена. Для отказов, связанных с температурой, используют уравнение Аррениуса [7], справедливое для кинетики химических реакций в статических условиях:

$$\frac{dM}{dt} = C \cdot e^{-\frac{qE}{kT}}, \quad (59)$$

где M — масса, t — время, q — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, E — энергия активации молекул вещества, C — константа, характеризующая вещество.

Интегрируя уравнение Аррениуса, получаем

$$t = \frac{M}{C} e^{\frac{qE}{kT}}. \quad (60)$$

После логарифмирования имеем

$$\ln(t) = \ln\left(\frac{M}{C}\right) + \frac{q \cdot E}{k \cdot T} = A + \frac{D}{T}. \quad (61)$$

Зависимость (61) легко представить графически (рис. 25): чем больше E , а следовательно и φ , тем изделие надежнее.

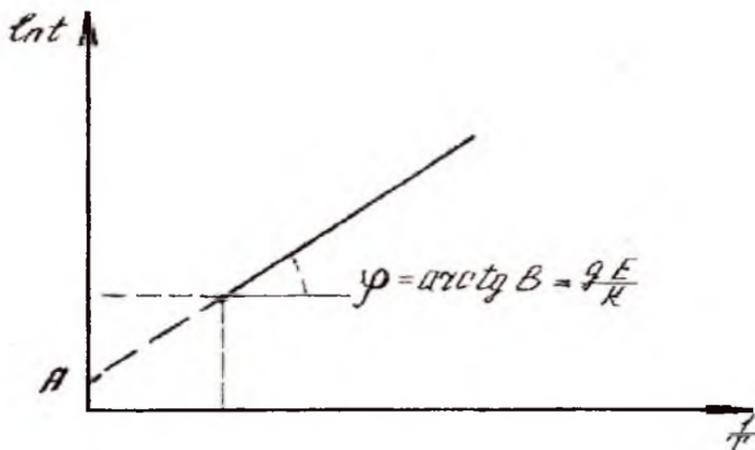


Рис. 25. Общая зависимость времени испытаний от нагрузки

Прогнозирующую зависимость можно построить следующим образом: берем две или несколько групп изделий и каждую из них разбиваем на части;

для каждой части устанавливаем свою температуру при испытаниях;

фиксируем время наработки до отказов в 1-й, 2-й и др. группах (например на уровнях 20 и 50% отказов).

Строим в логарифмических масштабах графики (рис. 26).

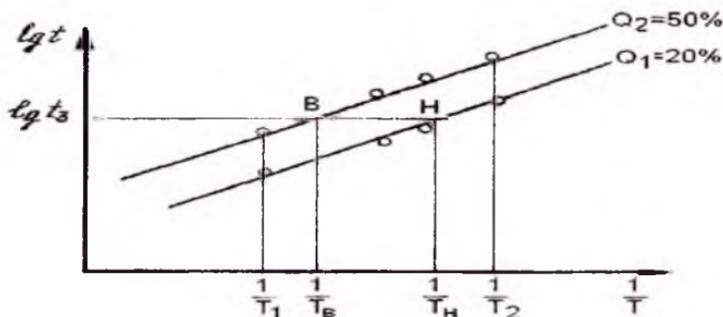


Рис. 26. Кривые уравнения Аррениуса при различном проценте накопленных отказов

Затем для заданного времени t_s определяем T_H и T_B и строим график зависимости $\lg Q$ от температуры ($1/T$). По этому графику (рис. 27) определяют вероятность безотказной работы для любой другой температуры окружающей среды, т. е. решают прямую задачу прогнозирования. Исходя из этой модели старения, описываемой уравнением Аррениуса, можно ускорить испытания за счет того, что увеличение нагрузки позволяет получить кривую для меньшего времени испытаний.

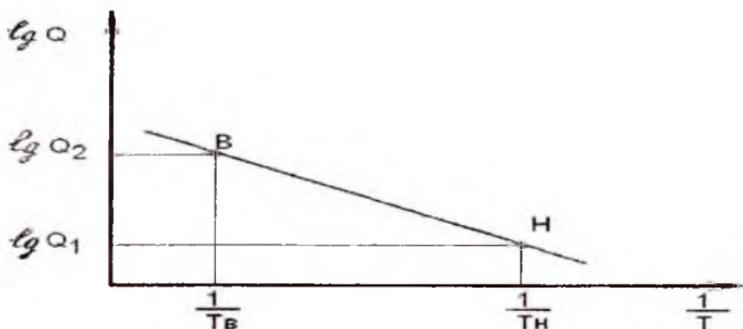


Рис. 27. Зависимость уровня отказов от воздействующей температуры

Экономия времени связана с величиной нагрузки при испытаниях. Так, если время испытаний при нормальной нагрузке T обозначить t , а при форсированной нагрузке T' — t' , то фактор ускорения $\Phi_y = t/t'$ можно определить из уравнения Аррениуса как

$$\Phi_y = e^{-\frac{qE}{kT} \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T} \right)} \quad (62)$$

При неизменном механизме отказов в условиях изменяющейся нагрузки по результатам испытаний изделия в форсированном режиме в течение времени t' можно судить об эквивалентном времени испытаний изделий в условиях нормальных нагрузок, которые можно определить как $t = \Phi_y t'$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усложнение радиоэлектронных средств, непрерывное расширение круга выполняемых ими задач, применение РЭС в тяжёлых эксплуатационных условиях и постоянное повышение требований к их надёжности вызывают необходимость в разработке и совершенствовании методов и средств их испытаний. От того насколько будут совершенны используемые методы и привлекаемые средства для испытаний РЭС, зависит эффективность в использовании финансовых и трудовых ресурсов, необходимых для выполнения целевой функции РЭС.

Основными источниками рационального и экономного использования затрат на испытания являются знания и опыт инженеров, осуществляющих планирование испытания, определение основных факторов, для которых в первую очередь необходимо выполнять испытания, их очередность и объём выборки. Важным является и полнота сведений, излагаемых в методиках для каждого вида испытаний и предназначенных для лиц, проводящих непосредственно эти испытания.

Рассмотренные методы и примеры позволяют определить не только объём выборки при выборочных испытаниях, но и методы их проведения с учётом интересов как изготовителя, так и потребителя РЭС.

В пособии рассмотрены также вопросы, связанные с повышением эффективности испытаний за счёт применения методов прогнозирования, ускоренных испытаний и сокращения времени испытаний путем перерасчёта норм на надёжность РЭС.

В целом изложенные методы испытаний представляют собой методологическую и научно-техническую базу, которая может быть использована студентами при изучении дисциплин, связанных с испытаниями технических средств, при подготовке контрольных заданий, при выполнении курсовых и дипломных работ, связанных с проектированием РЭС и технологическими процессами их изготовления и испытаний. Теоретические вопросы испытаний могут быть полезны и специалистам при разработке программ и методов испытаний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федоров, В. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств [Текст]: производственно-практическое издание / В. Федоров, Н. Сергеев, А. Кондрашин; под ред. В. К. Федорова. - М.: Техносфера, 2005. - 502 с.

2. Глудкин, О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС [Текст] / О.П. Глудкин. - М.: Высш. шк., 1991. - 336 с.

3. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование [Текст]: учеб. пособие для вузов / О.П. Глудкин, А.Н. Енгальчев, А.И. Коробов [и др.]; под ред. А.И. Коробова. - М.: Радио и связь, 1987. - 272 с.

4. Глудкин, О.П. Технология испытаний микроэлементов радиоэлектронной аппаратуры и интегральных микросхем [Текст] / О.П. Глудкин, В.Н. Черняев. - М.: Энергия, 1980 - 350 с.

5. Малинский, В.Д. Контроль и испытания радиоаппаратуры [Текст] / В.Д. Малинский. - М.: Энергия, 1970. - 336 с.

6. Регулировка и испытание радиоаппаратуры [Текст] / Д.Н. Ошер [и др.]. - М.: Энергия, 1978. - 384 с.

7. Статистические методы в технологии производства радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / О.Я. Глудкин [и др.]; под ред. В. Н. Черняева. - М.: Энергия, 1977. - 296 с.

8. ГОСТ Р 51804-2001. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Комбинированные испытания [Текст] - Введ. с 2002-07-01 - для вновь разраб. и модернизируемых изделий, для разраб. до 2002-07-01 изделий - 2004-07-01. - М.: Изд-во стандартов, 2001. - 7 с.

Учебное издание

Медников Валерий Александрович

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ РЭС

Учебное пособие

Редактор Т.К. Кретинина

Компьютерная верстка А.В. Ярославцева

Подписано в печать 22.12.2009. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 4,75.
Тираж 100 экз. Заказ **163**. Арт.С – 6(Д1)/ 2009

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.