



БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА ПО НАДЕЖНОСТИ



В. А. КУЛИКОВ

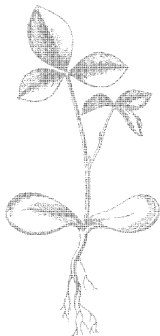
# ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ

СЛОЖНОЙ  
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ

В. А. КУЛИКОВ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
НАДЕЖНОСТИ  
СЛОЖНОЙ  
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ  
ПРИ МЕЛКОСЕРИЙНОМ  
ПРОИЗВОДСТВЕ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ Р. Б. УЛИНИЧА



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«СОВЕТСКОЕ РАДИО»  
МОСКВА — 1966

В книге рассматриваются основные вопросы обеспечения эксплуатационной надежности в применении к принятой последовательности изготовления аппаратуры сложных радиоэлектронных изделий при производстве малых серий. Оценивается влияние на надежность радиоэлектронной аппаратуры следующих факторов: качества конструирования и технической документации, переданной в производство, технологичности конструкции, качества сборочно-монтажных и настроечных работ, контроля производства, климатических и механических испытаний, инструкции по техническому обслуживанию, ремонтпригодности. Дается экономический анализ рассмотренных аспектов надежности.

Книга предназначена для производственно-технического персонала радиоэлектронной промышленности, занимающегося разработкой и производством радиоэлектронной аппаратуры. Она может быть также полезна для студентов радиотехнических вузов и техникумов.

**3—4—4****57—66**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ ПРИ МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

**ВАЛЕРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КУЛИКОВ**

Редактор *А. А. Александрова*

Техн. редактор *Г. З. Шалимова*

Художественный редактор *В. Т. Сидоренко*

Обложка художника *Д. З. Фишкина*

Сдано в набор 20. VI. 66 г.

Подписано в печать 15. VIII. 66 г.

Формат 84×108/32

Объем 7,14 усл. л.

Уч. изд. 7,3 п. л.

T-11228

Зак. 2521

Тираж 14 300 экз.

Цена 37 коп.

Бумага типогр. № 3

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Прогрессирующее усложнение задач, решаемых при помощи технических средств, вызвало специальное рассмотрение вопросов их надежности.

Методы теории вероятностей и математической статистики дают мощное орудие анализа надежности и помогают решить ряд задач, связанных с оптимизацией структуры аппаратуры и методов ее эксплуатации. Тем не менее распространенное представление, отождествляющее теорию надежности с некоторыми разделами математики, столь же неосновательно, как, например, ограничение проблем повышения точности механизмов и систем только метрологическими вопросами.

Повышение и оптимизация эксплуатационной надежности требуют разработки физических, экономических, организационных, технических и даже психологических проблем.

В книге В. А. Куликова рассматриваются вопросы обеспечения надежности весьма сложных радиотехнических устройств, производимых малыми партиями. В состав таких устройств при существующем уровне техники могут входить десятки тысяч элементов, сотни блоков и десятки шкафов. Обеспечение высокой надежности столь сложных устройств в производстве задача трудная и актуальная.

Конечно, сложность комплекса аппаратуры определяется объемом, разнообразием, точностью и методами обработки информации, а не физическим объемом аппаратуры. Однако при известных условиях представление о сложности аппаратуры можно получить исходя из числа элементов, образующих систему.

Это объясняется тем, что сравнительно быстрое изменение структурного построения аппаратуры в связи с появлением новых задач не сопровождается столь же быстрым изменением входящих элементов и состава типичных схемных узлов. Так, например, современные

мультивибраторы komponуются из 2—4-ламповых или транзисторных каскадов и являются обычно модификацией давно известной схемы.

Аналогично обстоит дело с такими распространенными устройствами как триггер, автогенератор синусоидальных колебаний, усилительный каскад и т. п. Даже более крупные объединения элементов обладают относительной «консервативностью» объема. Широкополосный усилитель промежуточной частоты обычно состоит из 5—8 каскадов, телевизионный приемник — из 20—30 каскадов и т. п.

В схему каскада обычно входит активный элемент (транзистор, лампа) и несколько пассивных элементов (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды). В среднем при существующем уровне техники на одну лампу приходится 8—12 и на один транзистор — 5—7 пассивных элементов.

До тех пор, пока аппаратура будет компоноваться из отдельных навесных элементов, ламп и полупроводниковых приборов, усложнение решаемых задач неизбежно будет сопровождаться увеличением числа элементов.

Условия мелкосерийного производства создают дополнительные трудности в обеспечении надежности в связи с недостатком времени для накопления опыта при производстве многих видов изделий, образующих выпускаемый комплекс аппаратуры. При таких условиях уже нельзя обойтись постепенным совершенствованием технологии изготовления того или иного отдельного устройства. Необходим комплекс более общих регламентаций, направленных на повышение и стабилизацию уровня технологического процесса, включая систему контроля. Такие регламентации, уменьшая энтропию в производстве, способствуют сокращению времени освоения и, в конечном итоге, обеспечивают надежность с первых образцов комплекса.

В книге рассматривается весь круг вопросов, связанных с производством надежной аппаратуры, начиная от взаимоотношений предприятия, выпускающего серийную аппаратуру, с ее разработчиком, характера конструкторской документации, методики анализа опытного образца и т. д. и кончая некоторыми экономическими вопросами.

Изложенный материал базируется в основном на опыте автора и содержит ряд полезных обобщений и практических рекомендаций. В работе используются также многие литературные источники. В связи с этим, на наш взгляд, следовало бы уделить больше внимания некоторым вопросам, касающимся прогрессивных тенденций в области проектирования и технологии, в частности унификации и эффекту квазимассовости в сложной аппаратуре.

Несмотря на сделанное замечание, книга несомненно будет полезна, особенно в условиях, когда производственные коллективы непрерывно обновляются за счет притока новых работников, не обладающих непосредственным опытом практической деятельности в области проектирования и производства сложной аппаратуры.

*Р. Улинич*

## ВВЕДЕНИЕ

Стремительный рост сложности и многообразия радиоэлектронной аппаратуры, вызванный интенсивным внедрением ее в различные области народного хозяйства, требует от современного производства обеспечения необходимого уровня эксплуатационной надежности выпускаемой продукции.

Под надежностью радиоэлектронной аппаратуры обычно понимается ее способность безотказно выполнять заданные функции в определенных условиях эксплуатации и времени. Предусматриваемая при конструировании эксплуатационная надежность зависит от многих факторов, которые требуют систематического контроля на всех этапах разработки, производства и эксплуатации.

При создании нового образца радиоаппаратуры учитываются все возможные условия ее эксплуатации, которые находят свое отражение в техническом задании на проектирование и в технических условиях на изготовление при серийном производстве. Однако конструктивная надежность изделия, достигнутая при разработке в лабораторных условиях, еще не гарантирует действительной его надежности при эксплуатации.

Решающее значение в обеспечении требуемого уровня эксплуатационной надежности имеет промышленный процесс изготовления радиоаппаратуры. Сохранение аппаратурой заданных параметров при серийном производстве зависит от стабильности свойств комплектующих элементов и деталей, строгого соблюдения технологической дисциплины при сборке, регулировке и приемосдаточных испытаниях.

Квалифицированный контроль процесса производства, всестороннее исследование и испытание опытных и серийных образцов в различных режимах и неблагоприятных внешних условиях вскрывают отдельные конст-

руктивные недочеты, зачастую не поддающиеся учету в чертежах, и тем самым повышают надежность выпускаемых изделий.

Исключительное значение в обеспечении надежности серийной радиоаппаратуры имеет оборудование заводских испытательных стендов и установок, с помощью которых может оцениваться ремонтпригодность и контролепригодность, номенклатура и объем ЗИП, соответствие инструкции по техническому обслуживанию изготавливаемой продукции реальным условиям эксплуатации и квалификации обслуживающего персонала.

Обеспечение эксплуатационной надежности радиоэлектронных устройств является ответственной задачей не только ученых, конструкторов, технологов, работников ОТК, всех производственно-технических служб предприятий радиопромышленности, но и непосредственных создателей материальных ценностей — рабочих. И хотя конструкция радиоприборов, которые обретают в их руках свою жизнь, весьма разнообразна, основные вопросы обеспечения надежности радиоаппаратуры при серийном производстве — вне зависимости от ее назначения, — являются общими для большинства радиоприборов и могут быть систематизированы по производственно-технологическим признакам.

За последние годы у нас появилось большое количество оригинальных печатных работ, посвященных вопросам надежности. В этих работах находят отражение лишь отдельные проблемы надежности и по своему изложению они рассчитаны на ограниченный круг читателей. Данная книга представляет собой первую попытку изложить основные вопросы обеспечения надежности радиоэлектронных устройств при производстве мелких серий в форме и последовательности, легко доступной для понимания читателя, занимающегося разработкой и производством радиоэлектронной аппаратуры.

Читатель должен получить представление:

— о том, что производственный процесс является одним из самых ответственных этапов решения проблемы надежности радиоэлектронной аппаратуры как общегосударственной задачи;

— о роли непосредственного создателя современной радиоэлектронной аппаратуры — рабочего, в деле обеспечения ее высокой эксплуатационной надежности;



— о задачах и возможностях инженерно-технического состава предприятий радиопромышленности по выпуску продукции высокого качества, соответствующей современному уровню науки и техники;

— о скрытых возможностях производства, умелое использование которых позволяет не только обеспечивать, но и повышать эксплуатационную надежность изготавливаемой аппаратуры.

При работе над книгой были использованы монографии и труды по вопросам надежности советских и зарубежных ученых: Я. Б. Шора, Б. В. Гнеденко, Б. Р. Левина, Г. В. Дружинина, К. Хинней, К. Уолша, Д. Коудена и др. Некоторая конспективность изложения вызвана ограниченным объемом книги, позволившим остановиться лишь на основных, по мнению автора, и не терпящих отлагательства для решения в процессе производства вопросах обеспечения эксплуатационной надежности радиоэлектронной аппаратуры.

В заключение автор выражает глубокую благодарность канд. техн. наук Р. Б. Улиничу, сделавшему много ценных замечаний при редактировании рукописи, и канд. техн. наук, доценту Н. О. Варганову, рекомендации которого при рецензировании способствовали улучшению книги.

# НАДЕЖНОСТЬ И КОНСТРУКЦИЯ

### § 1. НАДЕЖНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ — ОБЩАЯ ЗАДАЧА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

Радиоэлектронная аппаратура как и любой другой вид техники проходит через три этапа своего развития: проектирование, производство и эксплуатацию. Наиболее ответственным этапом по удовлетворению требованиям эксплуатационной надежности является этап проектирования. На этапе производства эти требования должны быть выполнены. От того, насколько всесторонне учтены при проектировании и изготовлении опытных образцов условия эксплуатации и производства с точки зрения обеспечения безотказности, ремонтпригодности и долговечности радиоэлектронной аппаратуры, настолько выпускаемая продукция будет обладать высокой эксплуатационной надежностью.

Таким образом, перед конструктором стоят две основные задачи — спроектировать аппаратуру с заданными характеристиками, что означает, спроектировать ее так, чтобы она выполняла все функции, для которых она предназначена, и спроектировать ее надежной. Приступая к решению этих задач, конструктор должен учитывать большое количество всевозможных факторов, определяющих как технико-экономическую целесообразность разрабатываемой аппаратуры, так и перспективы ее применения с учетом морального старения. Такое положение очевидно, и останавливаться на нем, на первый взгляд, может показаться нет необходимости. Однако это далеко не так.

Из практики известно, что в силу различных причин могут создаваться так называемые новые изделия, которые не всегда лучше существующих. Это может происходить вследствие недостаточной информации о существующих конструкциях различных изделий; недостаточного времени для получения с других предприятий технической документации и ознакомления с ней; организационных трудностей получения (в требуемые сроки) изделий по кооперированным поставкам; убежденности конструктора в несовершенстве комплектующих элементов, которые он мог бы использовать и т. п.

При проектировании современных радиоэлектронных систем важным является не только правильность оценки их технических и экономических показателей по сравнению с уже имеющимися, но и правильность оценки времени, необходимого на освоение нового изделия в производстве. Самое совершенное новое изделие может оказаться бесполезным, если оно не будет изготовлено к требуемому сроку. В этом тесная связь проектирования и производства при обеспечении необходимого уровня эксплуатационной надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры.

Вновь разрабатываемая радиоэлектронная аппаратура должна характеризоваться не только тем, что она существенно лучше по отношению к имеющейся, но и в максимально возможной степени отвечает современным научно-техническим достижениям. Однако необходимо помнить, что новейшие достижения науки и техники не всегда могут быть быстро освоены в процессе производства. Следовательно, одна из главнейших задач конструктора состоит в умении использовать эти новейшие достижения и одновременно добиться того, чтобы в процессе проектирования и освоения вновь разрабатываемая аппаратура морально не устаревала. Поспешность разработки может привести к систематическим переработкам в дальнейшем в связи с появлением технических новинок, что влечет за собой затягивание разработки. Опоздание с началом разработки приводит к отставанию в развитии данной области техники и является непоправимой ошибкой для проектирования и производства.

Обеспечение высокого уровня эксплуатационной надежности сложных радиоэлектронных систем при про-

ектировании и производстве осуществляется в настоящее время по следующим основным направлениям:

- повышение надежности комплектующих элементов и деталей;

- правильный выбор режимов работы элементов;

- применение унифицированных схем, модулей, микромодулей и других новых принципов конструирования;

- резервирование;

- применение встроенных автоматизированных систем контроля и прогнозирования отказов;

- улучшение качества контроля технологии производства на всех ее стадиях;

- механизация и автоматизация сборочно-монтажных, настроечных и контрольно-регулирующих работ.

Высокая надежность может быть достигнута только совместным применением всех вышеперечисленных мероприятий.

Каждый конструктор знает, что всегда имеется несколько направлений проектирования радиоэлектронной аппаратуры с заданными характеристиками. Однако выбор направления проектирования затрудняется, когда нужно найти решение одновременно удовлетворяющее требованиям эксплуатационной надежности и требованиям к внешним характеристикам аппаратуры. В этом случае приходится оценивать целый ряд возможных вариантов конструкций, в которых, в первую очередь, стремятся получить заданные значения выходных параметров. Но выбор окончательного варианта конструкции должен определяться по результатам предварительного анализа надежности, который дает правильное представление о том, какой из рассмотренных вариантов обеспечит самую высокую надежность аппаратуры и позволит выполнить заданные требования к надежности наиболее простыми методами в процессе производства.

Еще недавно недооценка вопросов надежности в процессе проектирования приводила к тому, что до 40% неисправностей и отказов в радиоэлектронной аппаратуре происходило по вине разработчиков: неправильных решений инженеров-проектировщиков, погрешностей в расчетах, небрежности и т. п.

Заданный уровень эксплуатационной надежности в процессе проектирования достигается в основном на трех этапах:

1. Выбор по результатам предварительного анализа надежности различных пробных конструкций одного определенного варианта.

2. Проведение анализа надежности и испытания окончательного варианта конструкции для проверки заданных требований эксплуатационной надежности.

3. Испытание опытного образца и сопоставление полученных практических результатов с данными второго этапа. Если результаты совпадают, то конструкцию не меняют, и образец идет в производство. Если совпадение неудовлетворительное, то конструкция может претерпеть значительные переделки в тех частях, где наблюдается повышенная частота отказов.

Следует очень тщательно проводить анализ надежности на первом и втором этапах проектирования с тем, чтобы исключить необходимость изменения конструкции после изготовления опытного образца.

Предварительный анализ надежности на первом и втором этапах проектирования применим как при разработке новой аппаратуры, так и при модернизации старых образцов. Сначала теоретически сравниваются различные возможные варианты структуры по показателям надежности и альтернативным решениям, предлагаемым конструктором в качестве пробных подходов. Выполняемый при этом анализ электрических схем и нагрузок помогает выбрать комплектующие элементы с удовлетворительными значениями интенсивностей отказов, отвечающих требованиям эксплуатационной надежности. Составляются схемы надежности для различных вариантов, показывающие, где используется последовательное соединение элементов, а где резервное, и в соответствии с заданными требованиями вычисляется вероятность безотказной работы  $P(t)$  электронной системы в течение интервала времени  $t$ , необходимая для выполнения поставленных задач, или ее средняя наработка на отказ  $T_{\text{ср}}$ . Интенсивность отказов элементов для вычисленных уровней нагрузки определяется по кривым зависимости интенсивности отказов элементов от значений номиналов или выдается службой надежности предприятия. Время, в течение которого отдельные

элементы включены, также учитывается, если оно отличается от наработки аппаратуры. Методика анализа надежности подробно изложена в работах [1—4].

Важнейшим моментом при любом расчете надежности системы следует считать получение достоверных данных об интенсивности отказов применяемых в ней элементов. Эти данные существенны для надлежащего выбора элементов и проведения анализа надежности на реальной основе. Средние значения интенсивности отказов элементов целесообразно использовать только для ориентировочных расчетов. Для проектирования радиоэлектронной аппаратуры необходимо иметь данные об интенсивности отказов используемых элементов с учетом конкретного способа их изготовления, т. е. элементы одинаковых типов, но разной технологии изготовления, имеют различные интенсивности отказов.

Для создания надежных конструкций сложных радиоэлектронных устройств при проектировании и производстве большое значение имеет служба надежности [5], которая должна выполнять следующие функции:

- организовывать и руководить всеми работами по обеспечению высокого уровня надежности выпускаемых изделий;

- осуществлять научно-методическое руководство и контроль подразделений предприятия в части надежности;

- проводить анализ фактического уровня надежности выпускаемых изделий;

- анализировать причины выявляемых в эксплуатации конкретных отказов и неисправностей изделий;

- анализировать причины недостаточной надежности правильно изготовленных и правильно эксплуатируемых изделий;

- разрабатывать конкретные мероприятия по устранению выявляемых недостатков и дальнейшему повышению уровня надежности изделий.

Основными и важнейшими направлениями работы службы надежности при проектировании сложных, многофункциональных устройств можно считать следующие:

- структурный анализ, оценка и обеспечение надежности изделий в процессе их создания;

— разработка и утверждение программ и проведение испытаний изделий на надежность (в том числе и ускоренных);

— анализ статистической информации, получаемой в процессе разработки и производства;

— изучение и инженерный анализ результатов эксплуатации изделий;

— определение показателей надежности;

— подготовка и выдача руководящих технических материалов для разработчиков, производственников и эксплуатационников.

Одним из основных мероприятий по обеспечению требований эксплуатационной надежности на этапе расчета электрических схем и компоновки элементов является уменьшение нагрузки на элементы, обусловливаемой внешней средой. С целью повышения эксплуатационной надежности необходимо стремиться к тому, чтобы большинство деталей и элементов сложных радиоэлектронных устройств работало в облегченных режимах, т. е. имело определенный запас прочности. Особое внимание следует уделять облегчению режимов работы наиболее ответственных и трудно заменяемых при эксплуатации элементов и деталей.

Режим работы элементов определяется коэффициентом нагрузки, выражаемым в общем виде формулой

$$K_n = \frac{N_{\text{раб}}}{N_{\text{ном}}},$$

где  $N_{\text{раб}}$  — нагрузка элемента в рабочем режиме;

$N_{\text{ном}}$  — номинальная (предусмотренная техническими условиями) нагрузка элемента.

Так, например, для электронных ламп коэффициент нагрузки можно записать.

$$K_n = \frac{P_a + P_n + P_c}{P_{a \text{ макс}} + P_{\text{ном}}},$$

где  $P_a$  — мощность, рассеиваемая на аноде;

$P_n$  — мощность, рассеиваемая в цепи накала;

$P_c$  — мощность, рассеиваемая на сетке;

$P_{a \text{ макс}}$  — максимально допустимая мощность анода;

$P_{\text{ном}}$  — номинальная мощность накала.

Коэффициент нагрузки для проволочных и углеродистых резисторов определяется как

$$K_n = \frac{P_p}{P_{ном}},$$

где  $P_p$  — рассеиваемая мощность;  
 $P_{ном}$  — номинальная мощность.

Использование элементов электрической схемы в нагруженном и перегруженном режимах, т. е. при  $K_n \geq 1$ ,

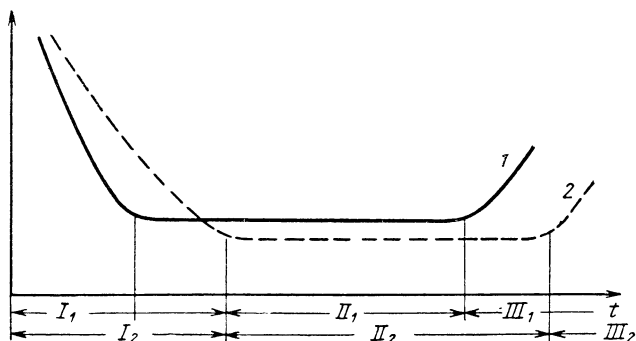


Рис. 1.1. Изменение интенсивности отказов элементов при нагруженном (кривая 1) и облегченном (кривая 2) режимах работы.

резко сокращает их срок службы и приводит к преждевременным отказам аппаратуры. Наоборот, использование элементов в облегченном (разгруженном) режиме, т. е. при  $K_n < 1$ , увеличивает продолжительность нормальной работы аппаратуры и уменьшает общую интенсивность отказов.

Из сравнения кривых (рис. 1.1), характеризующих поведение интенсивности отказов элементов в течение срока службы, следует, что хотя при облегченном режиме использования элементов первый  $I_2$ , начальный период работы аппаратуры, несколько удлиняется (так как производственные дефекты элементов проявляются медленнее), зато третий период  $III_2$ , связанный со старением и износом элементов, наступает значительно позже [3].

Другим важнейшим условием обеспечения надежности конструкции радиоэлектронной аппаратуры при про-



ектировании и производстве является правильный выбор и расширение поля допусков на выходные и стыковочные параметры узлов, блоков и элементов аппаратуры. Чем шире заданные пределы допусков, тем лучше управляемость технологического процесса производства, тем длительнее период, в течение которого система может нормально функционировать, т. е. тем позднее произойдет отказ из-за ухода параметров за допустимые пределы. Ниже будут рассмотрены факторы, определяющие установление пределов допусков.

Следует не забывать, что при проектировании способов компоновки элементов самое серьезное внимание должно быть уделено ремонтпригодности выбранной конструкции. В радиоэлектронной аппаратуре многократного действия должен легко осуществляться доступ к элементам с максимальной интенсивностью отказов и их замена.

Третьим направлением обеспечения высокой эксплуатационной надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры при конструировании и производстве является отбор из большого разнообразия вариантов схем, данного целевого назначения, таких, которые бы имели наибольшую надежность. Отбор рекомендованных схем, которые иногда называют унифицированными, а если они утверждаются как обязательные, то — стандартными, — процесс очень длительный, связанный с кропотливой экспериментальной работой.

Указанные конструктивные направления неразрывно связаны и являются логическим развитием функционально-узлового метода конструирования радиоэлектронной аппаратуры. Сущность этого метода состоит в повышении надежности аппаратуры за счет качественной отработки функционально законченных и конструктивно оформленных узлов-модулей, из которых в дальнейшем могут быть собраны различные блоки самых разнообразных радиоэлектронных систем. Разработка и внедрение в производство высоконадежных, функционально завершенных схем и узлов, оформленных в виде стандартных конструкций, позволяют:

- упростить разработку новой аппаратуры и сократить время на ее проектирование;
- увеличить эксплуатационную надежность за счет применения узлов нормированной надежности;

— устранить параллельное проектирование различными предприятиями идентичных схемных блоков для различных радиотехнических устройств;

— организовать механизированные и автоматизированные предприятия по производству модулей, микромодулей и функциональных блоков, что приведет к повышению производительности труда и увеличению выпуска продукции на имеющихся производственных площадях;

— легко модернизировать радиоэлектронную аппаратуру, не внося коренных изменений в ее конструкцию;

— быстро отыскивать неисправности и тратить меньше времени на восстановление работоспособности аппаратуры, так как оно может сводиться не к замене отдельных деталей, а к замене всего стандартного элемента и последующему ремонту его в специализированной мастерской;

— упростить обучение персонала, связанного с ремонтом аппаратуры, обслуживать аппаратуру менее квалифицированным составом;

— уменьшить количество запасных частей на складах благодаря взаимозаменяемости узлов в различной по назначению аппаратуре и обеспечить более простое снабжение запасными частями.

Нельзя не указать на одну из основных проблем надежности, связанную с современным уровнем производства радиодеталей и элементов, которая состоит в том, чтобы из менее надежных комплектующих элементов конструировать высоконадежную радиоаппаратуру. Решение этой проблемы идет по пути резервирования как отдельных малонадежных элементов и узлов, так и всей аппаратуры в целом. Применение резервирования является одним из наиболее действенных способов повышения надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры. Однако следует иметь в виду, что применение резервирования неизбежно ведет к усложнению аппаратуры, увеличению ее веса и габаритов. Поэтому при проектировании радиоэлектронной аппаратуры для обеспечения требуемого уровня надежности следует применять резервирование только тогда, когда использованы все остальные, более дешевые способы повышения надежности и когда в этом имеется крайняя необходимость.

Суммируя все изложенное, можно предложить ряд рекомендаций, разумное использование которых при проектировании позволит не только создавать надежные конструкции, но и реализовывать их в производстве. К ним следует отнести:

- упрощение конструкции и сокращение до минимума числа элементов без ухудшения выходных характеристик за счет применения рациональных схемных решений;

- проверку надежности конструкции путем анализа надежности на всех этапах проектирования;

- максимально возможное расширение поля допусков на параметры входящих элементов и узлов;

- максимально возможное облегчение режимов работы элементов за счет снижения рабочих параметров по сравнению с номинальными;

- уменьшение рабочей температуры элементов в аппаратуре, предусмотрев для этого теплоотводы, соответствующую компоновку, и, если необходимо, хорошее охлаждение;

- устранение вибраций с помощью хорошей амортизации;

- защита от ударов, влажности, коррозии и т. д.;

- задание требований к надежности комплектующих элементов;

- уточнение условий испытаний и методики приработки выпускаемой аппаратуры.

Точное задание технических требований к надежности элементов и аппаратуры в целом, нормам отбраковки и приработки изготовленной аппаратуры необходимо для обеспечения уровня надежности, заложенного при проектировании, на стадиях изготовления, сборки и настройки.

## § 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КАК ФАКТОР НАДЕЖНОСТИ

Изготовление любого современного радиоэлектронного устройства невозможно без того, чтобы оно в полной мере не было описано технической документацией, важнейшей частью которой являются технические условия (ТУ) как на входящие элементы, так и на систему в целом. Назначение ТУ заключается в том, чтобы конструктор, технолог, регулировщик, работник ОТК и заказчик с достаточной ясностью могли оценить требова-

ния, предъявленные к изделию, нормы его выходных параметров, условия их определения и условия эксплуатации. Часто в ТУ оговариваются: упаковка, транспортировка, условия хранения, ресурс и гарантийные обязательства. Практика показывает, что, не усложняя рабочих чертежей, путем введения в них многословных примечаний добиться достаточно исчерпывающего описания всех требований, предъявляемых к конструкции, все же не удастся. Вместе с тем, всякое, даже на первый взгляд кажущееся незначительное требование, оставшееся не отраженным в технической документации, может стать причиной брака «без виновника».

Конструктор прежде чем приступить к разработке нового изделия с исчерпывающей полнотой, включая даже самые второстепенные детали, должен рассмотреть требования, предъявляемые к изделию, и условия его использования.

Для конструктора не может быть мелочей, так как пренебрежение ими или недооценка их, как правило, приводит к печальным последствиям, характеризующимся неполноценностью получаемых при этом результатов и большой потерей времени на проведение доработок, переделок, регулировку и т. п.

Одной из причин недостаточной надежности радиоэлектронной аппаратуры очень часто являются завышенные требования технического задания, а также отсутствие в них каких-либо требований к уровню надежности и учета особенностей эксплуатации. Это приводит к конструированию вслепую и отрицательно сказывается на надежности разрабатываемой аппаратуры. Введение в техническое задание обоснованных требований к надежности радиоаппаратуры намного облегчает как составление самих ТУ, так и взаимоотношения поставщика и заказчика в процессе проектирования и производства.

На основании заданных условий эксплуатации и соответственно объективных требований к надежности в ТУ должны быть четко определены нормы на надежность. Введение в раздел «Технических требований» ТУ конкретных количественных показателей надежности радиоэлектронной аппаратуры намного упрощает производство и приемку готовой продукции и, следовательно, к потребителю не поступит аппаратура, не отвечаю-

шая эксплуатационным требованиям. В качестве таких показателей могут быть рекомендованы: наработка на отказ, коэффициент технического использования, коэффициент готовности, вероятность безотказной работы, ресурс до капитального ремонта.

Таким образом, одним из основных условий создания высокой надежности аппаратуры является обоснованность и оптимальность технических требований, предъявляемых к разработке нового изделия. Ошибки, неточности или излишества в требованиях к вновь разрабатываемому изделию усложняют аппаратуру, удлиняют производственный цикл изготовления и приводят к неоправданному возрастанию ее стоимости. Следовательно, уровень эксплуатационной надежности изделия, достигаемый в процессе производства, определяется техническими условиями и зарождается при составлении технического задания на проектирование.

Учитывая это условие, можно сделать вывод, что ответственность за создание надежных радиоэлектронных систем несут различные инстанции как в промышленных, так и в административных учреждениях. Технические условия являются следствием технического задания на проектирование. ТУ на каждое новое изделие проходят ряд утверждающих инстанций, назначение которых — осуществлять технический контроль и одновременно исключать возможность скороспелых, непродуманных, частых изменений отдельных пунктов ТУ.

С одной стороны, наличие такого количества инстанций затрудняет работу конструктора, но, с другой стороны, в значительной мере повышает ответственность как заказчика, так и исполнителя. Однако, несмотря на это, в практике еще довольно часто встречаются технические условия, в существенной мере затрудняющие работу производителей, вызывающие многочисленные и подчас совершенно ненужные (а часто даже вредные для дела) дискуссии с заказчиком, влекущие за собой снижение внимания к технологии изготовления и излишние материальные затраты. Подобного рода дискуссии относятся не столько к существу, сколько к форме отдельных пунктов технических условий.

Контрольным рубежом проверки качества и надежности выпускаемой аппаратуры является проверка ее на соответствие требованиям ТУ. Поэтому помимо необхо-

димого объема предъявляемых к изделию требований в технических условиях должны быть достаточно ясно и точно сформулированы нормы и условия определения выходных параметров готовых изделий. Связь между качественным составлением технических условий на современный радиоэлектронный прибор и его надежностью самая непосредственная.

Насколько полно и глубоко охвачены проверкой входные и выходные параметры изделия, рабочие режимы промежуточных электрических цепей, соответствие изготовленного образца своей принципиальной схеме, настолько выше его эксплуатационная надежность.

Очень часто, несмотря на общность цели, заказчик, разработчик и поставщик не имеют одинакового подхода к одному и тому же пункту требований ТУ. Как бы ни был реалистичен подход заказчика к выполнению поставленной задачи, он по своему положению стремится получить более высокие нормы выходных параметров изделий. С другой стороны, разработчик при проектировании очень осторожно подходит к принятию той или иной нормы. И это понятно, так как ему приходится выполнять принятые нормы, а это обычно является далеко не лёгкой задачей. Подобные противоречия между требованиями заказчика и предложениями разработчика при отработке опытного и первых серийных образцов приводят к принятию компромиссных норм, как правило удовлетворяющих заинтересованные стороны.

Установление норм на технические параметры изделия является наиболее трудным этапом работы конструктора. Для того чтобы установить нормы на выходной параметр изделия, обеспечивающие его наиболее долговечную и безотказную работу, конструктор должен прежде всего знать:

- область допустимых значений параметра, при которых гарантируется выполнение изделием установленных функций в заданных условиях эксплуатации;

- область возможных случайных отклонений от заданных средних значений, определяющихся всем производственным процессом изготовления изделия;

- возможные ошибки при определении ее числового значения в процессе контроля и испытаний;

- величину возможных дополнительных неточностей, которые не могут быть установлены в процессе за-

водских испытаний, но могут выявиться в процессе эксплуатации.

Важным разделом технических условий являются требования к выполнению аппаратурой заданных функций при воздействии механических и климатических внешних факторов. Поэтому в них должен быть подробно указан необходимый минимум климатических и механических испытаний в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, причем нормы испытаний сложной радиоэлектронной аппаратуры должны быть заданы так, чтобы по результатам испытаний можно было получать максимальную информацию о возможном проявлении качества изготовления в процессе эксплуатации.

Большое значение при отработке ТУ, придания им определенной завершенности в процессе производства имеет опыт регулировщиков и работников ОТК. Всякая недоговоренность в разделе ТУ «Методика испытаний» вызывает серьезные осложнения при настройке и заводских испытаниях радиоэлектронной аппаратуры. Методика испытаний должна составляться и отрабатываться до мельчайших подробностей при обязательном участии работников отдела технического контроля. При этом всегда необходимо помнить, что она не менее важна, чем отработка норм выходных параметров. Методика испытаний по своему существу является частью характеристики норм выходных параметров, а иногда и основной их характеристикой.

Практика показывает, что неполноценность методики затрудняет изготовление аппаратуры, соответствующей требованиям ТУ, даже при весьма грубых нормах на выходные параметры. Наоборот, правильно составленная методика позволяет без лишних затруднений обеспечить выполнение достаточно строгих норм на выходные параметры изделия. Сопряжение установленных в ТУ норм параметров с возможностью их технического выполнения при серийном производстве — необходимое условие высокой эксплуатационной надежности.

Добиваясь необходимого уровня надежности выпускаемой продукции, работники ОТК совместно с разработчиком должны:

— отшлифовать ТУ, определяя оптимальное количество пунктов требований;

— дополнять технические требования и исключать лишние, зачастую необоснованно переносимые из лабораторных условий в производство;

— уточнять и упрощать изложение методики проведения приемо-сдаточных испытаний.

Технические условия, являясь основным документом, определяющим взаимоотношения поставщика и заказчика, при всей своей исчерпывающей полноте должны быть лаконичными, точными, не вызывающими различных толкований. Параметры функционально завершеного радиоэлектронного узла, установленные техническими условиями, должны быть такими, чтобы при точном их соблюдении в процессе изготовления и приемо-сдаточных испытаний вероятность достижения предельных значений была мала.

Каждая величина выходного параметра всегда ограничивается некоторой областью ее значения. В одних случаях эта область ограничивается предельными значениями без указания средних величин, в других указываются средняя величина и допустимые отклонения (допуски). В обоих случаях область допустимых отклонений выходного параметра выбирается исходя из условий процесса производства и условий эксплуатации. При этом указанная в ТУ величина допуска должна учитывать все ошибки измерительных средств, с помощью которой она определяется в производстве, при приемо-сдаточных, периодических и эксплуатационных испытаниях. В методике испытаний при указании типа контрольно-измерительного прибора и его класса точности ошибки, оговоренные ТУ, должны относиться к производственным, а не к лабораторным или, тем более, к уникальным измерительным средствам. Область допустимых отклонений выходного параметра должна с запасом перекрывать расчетную, учитывающую все погрешности измерений.

В практику приемки готовой продукции при проверке ее выходных параметров на соответствие нормам, указанным в ТУ, следует ввести технологические нормы ОТК для каждого конкретного предприятия радиопромышленности. Эти нормы должны быть более жесткими, чем нормы, установленные ТУ. В случае выхода контролируемого параметра за установленные на данном предприятии нормы ОТК (например, технологические



нормы ОТК могут быть на 10—20% выше заданных ТУ), изделие (блок, узел и система) должно браковаться и отправляться обратно в настройку. Это повысит требовательность регулировщиков к качеству настройки аппаратуры, а следовательно, позволит обеспечивать высокий уровень надежности выпускаемой продукции.

Немаловажным в обеспечении высокой надежности радиоэлектронной аппаратуры являются конкретные требования технических условий к упаковке и транспортировке. От того, в каком виде дойдет до заказчика изготовленная аппаратура, будет зависеть ее дальнейшая безотказная работа в условиях эксплуатации. Практика показывает, что непродуманные конструкция тары и способы транспортирования приводят к тому, что еще не поступившая к потребителю аппаратура требует ремонта, надежность ее падает, а стоимость возрастает.

Поэтому в ТУ не должно быть требований к упаковке и транспортировке, составленных в общих фразах, например: «упаковка должна быть тщательной, а транспортировка соответствовать нормам перевоза специальных грузов», и т. п. В требованиях к упаковке сложных, а следовательно, и дорогостоящих радиоэлектронных устройств должен быть четко определен характер, исходя из специфичности условий эксплуатации аппаратуры, со ссылками на необходимые чертежи и инструкции.

Условия транспортировки целесообразно оговаривать подробно, отмечая необходимость соблюдения определенного порядка. Например, «транспортировка по железной дороге допускается только в контейнерах» ... «в случае перевозки морским транспортом ящики должны обиваться цинковыми листами, соединенными (спаянными) герметичными швами» и т. п.

В технических условиях для удобства пользования в процессе производства должны содержаться следующие основные разделы:

1. Назначение блока (узла, системы) с краткой характеристикой его использования.
2. Технические требования к блоку (узлу, системе) с краткой характеристикой входных и выходных параметров и допустимые области их значений.
3. Приемосдаточные и периодические испытания с перечнем выходных параметров, подлежащих различным видам контроля и испытаний.

4. Методика и условия, в которых должно проводиться определение выходных параметров.
5. Условия упаковки, транспортировки и хранения.
6. Ресурс.
7. Гарантийный срок службы.
8. Специальные условия.

### § 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА — КОНТРОЛЬНАЯ ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Заключительным этапом обеспечения заданной надежности при проектировании современных сложных радиоэлектронных систем является изготовление опытного образца. В процессе его изготовления обычно уточняются взаимные связи сопрягаемых узлов и блоков, устанавливаются закономерности, которые иногда трудно предугадать при расчете. Следовательно, опытное производство должно позволять относительно быстро изменять условия изготовления и тем самым находить нужную область изменения первичных параметров или внешних факторов.

Во избежание непредвиденных случайностей иногда проводят изготовление не одного, а двух-трех опытных образцов.

К сожалению, такой способ отработки конструкции разработанной аппаратуры ведет к значительному возрастанию стоимости. Однако в тех случаях, когда необходима уверенность в том, что при изготовлении данного образца в процессе серийного производства будет обеспечен требуемый уровень эксплуатационной надежности, такую отработку осуществлять необходимо. При изготовлении опытной партии уменьшается вероятность появления неточностей конструкции в процессе производства.

Трудоемкость процесса изготовления опытного образца, требующего немалого времени и средств, должна окупаться полученными результатами.

Изготовленный таким образом опытный образец позволяет:

— производить проверку надежности конструкции путем анализа реальных характеристик опытного образца. По своему характеру испытания опытного образца относятся к статическим испытаниям надежности, и за-

дача их состоит в том, чтобы проверить, соответствует ли надежность образца величине, предсказанной предыдущим анализом. Факторы, не учтенные во время проектирования и анализа, могут выявиться во время испытаний;

— обеспечивать соответствие рабочим чертежам, т. е. уровень проработки, состав и характер конструкторской документации должны соответствовать конкретным условиям производства и эксплуатации.

Конструкторская документация должна способствовать сохранению надежности изделия при его изготовлении. Поэтому в конструкторской документации следует предусматривать подробные инструкции для пооперационной регулировки и контроля. Каждое изделие должно иметь четкую и удобную для применения инструкцию по эксплуатации. При отработке технической документации следует рассчитывать на случаи невысокой квалификации и недобросовестности работников производства и эксплуатации;

— отрабатывать технологичность конструкции, т. е. получать такую конструкцию, которая бы полностью удовлетворяла предъявленным к ней эксплуатационным требованиям и одновременно давала возможность применять высокопроизводительные методы изготовления образца при рациональном использовании производственного оборудования и материалов и могла быть выпущена в кратчайшие сроки при минимальных затратах рабочей силы и материальных средств.

Однако при изготовлении опытного образца, контроле и испытаниях ожидаемые результаты могут быть получены с определенной степенью точности. Последняя зависит от точности исходных данных и точности изготовления. Поскольку изготовление опытного образца, как показывает практика, определяется конкретными производственными условиями, то к результатам испытания одиночного опытного образца следует относиться с большей осторожностью и не делать по нему преждевременных заключений.

Нередко изготовление узлов и блоков опытного образца производится высококвалифицированными механиками и монтажниками, которые, чтобы добиться заданных конструкторской документацией данных, прибегают ко всякого рода подгонкам, пригонкам,

регулировкам и тому подобным действиям, не предусмотренным конструктором. В результате данные опытного производства получаются существенно искаженными.

Вследствие того, что отработка технологичности конструкции опытного образца выполняется в условиях, которые при последующих повторениях не смогут быть точно воспроизведены, т. е. когда образец делается с большей или меньшей точностью, чем это требуется для данного вида производства, ошибки самого процесса изготовления опытного образца и примененных измерительных средств могут привести к дополнительным ошибкам при серийном производстве.

Приступая к производству сложной радиоэлектронной аппаратуры, следует знать источники возможных случайных ошибок, предугадать которые при проектировании невозможно, и методы их компенсации в процессе производства, для того чтобы обеспечить необходимый уровень эксплуатационной надежности.

Приведем следующие группы возможных ошибок:

1. Ошибки разработчика при выборе общей идеи узла, блока или системы, а также погрешности расчета и эксперимента, на основании которых были окончательно установлены номинальные значения параметров и возможные отклонения от них при изготовлении опытного образца.

Особенность этих ошибок заключается в том, что они повторяются (во всяком случае, должны повторяться) от изделия к изделию, и в этом смысле они имеют систематический характер. Величина этой систематической ошибки конструктору заранее не известна. Более того, он склонен предполагать, что она достаточно мала и ею можно пренебречь. Конструктору часто бывает известна неизбежность ошибки при разработке, но ему не всегда известна ее величина, а часто даже и характер.

Если бы разработчику было все известно о допускаемой им ошибке, то, очевидно, он ее мог бы учесть и в конструкторской документации она не существовала бы в скрытом виде. Ошибки конструктора, не известные при проектировании, должны выявляться на опытных и первых серийных образцах сложных радиоэлектронных изделий. По найденному характеру и величине ошибок

в конструкцию должны вводиться необходимые исправления, которые способны, как показывают проводимые в этом направлении работы [6, 7], уменьшить величину ошибки до допустимых значений. Если этого сделать не удастся или изменение конструкции является нецелесообразным, то в таком случае прибегают к компенсации возможных ошибок выходного параметра. Способы компенсации могут быть различными, и выбор их определяется конкретными условиями.

2. Ошибки, возникающие в результате погрешностей оформления конструкторской документации. Основное отличие этих ошибок от названных выше состоит в том, что если они будут обнаружены, то их можно исправить и тем самым избежать в изготавливаемой аппаратуре. Другая особенность этих ошибок состоит в том, что в большинстве случаев они обнаруживаются только после изготовления опытного образца или опытной партии изделий. При этом следует иметь в виду, что даже после изготовления опытной партии рассматриваемые ошибки не всегда сразу проявляются из-за большого удельного веса других ошибок.

Если проанализировать любое радиотехническое производство, то без большого труда можно обнаружить прямую связь между ошибками, возникающими в результате погрешностей оформления конструкторской документации, и ошибками, возникающими при разработке изделия и организации производства. Широкие области допустимых значений выходного параметра конструкции или широкие возможности предусмотренной в ней компенсации ошибок первичных параметров позволяют часто компенсировать и ошибки, получающиеся в результате недоброкачественной конструкторской документации. Опасность такой маскировки ошибок второй группы заключается в том, что она не приведет к нарушению производственного процесса, но может повлиять на процесс эксплуатации.

Замечено, что особенно частые случаи маскирования ошибок чертежей наблюдаются в конструкциях, производственная проверка которых затруднена. Разумеется, что все ошибки второй группы не могут компенсироваться, а если компенсация и осуществляется попутно с компенсацией других ошибок, то это только мешает их своевременному обнаружению. Поэтому ме-

годы предотвращения подобного рода ошибок должны сводиться к тщательной проверке конструкторской документации при ее подготовке и в процессе производства, а также к установлению таких норм на допуски выходных и внутренних параметров, узлов, блоков, шкафов и аппаратуры в целом, при которых всякие аномалии в конструкциях отражались бы на этом параметре.

3. Ошибки производственного происхождения, являющиеся результатом погрешностей параметров исходных материалов, погрешностей технологического процесса и его выполнения, недостатков заводского хранения и упаковки изделия. Эти ошибки являются наиболее многообразными и сложными вследствие многочисленных причин, их порождающих. Причинами могут быть как систематические, так и случайные факторы. Так, к систематическим ошибкам этой группы можно отнести систематические погрешности параметров исходных материалов или полуфабрикатов и технологических процессов их переработки.

4. Ошибки, связанные с неудовлетворительной транспортировкой комплектующих изделий, характеризуются тем, что они являются результатом внешних воздействий на изделие в процессе транспортирования. Чаще всего это механические воздействия: ударная и вибрационная тряска. Не менее часто таким воздействием является окружающая среда с повышенным уровнем влажности. Кроме указанных могут иметь место и другие виды внешних воздействий. Во многих случаях при серийном производстве эти ошибки можно устранить, предусмотрев специальную упаковку изделий для защиты от внешних воздействий, возникающих в процессе хранения и транспортировки.

Практика показывает, что в процессе транспортировки в большей мере изменяются параметры регулировочных элементов. Поэтому число таких элементов с этой точки зрения должно быть минимальным или должна быть предусмотрена их надежная защита от механического воздействия.

5. Ошибки, возникающие из-за неправильного хранения, по своему характеру и природе очень близки к ошибкам, возникающим в процессе транспортировки. Отличаются они только тем, что реже являются результатом внешних механических воздействий и чаще ре-

результатом длительного воздействия окружающей атмосферы.

Устранение этих ошибок в условиях серийного производства должно производиться теми же методами, что и для ошибок четвертой группы. Однако часто не все ошибки, возникающие в результате нарушения требований по хранению, могут быть устранены. При длительном хранении в изделии могут произойти необратимые изменения свойств материалов и геометрических форм деталей, компенсация которых не предусмотрена конструкцией. Избежать этих изменений, строго говоря, нельзя, но можно их существенно уменьшить путем целесообразного конструирования и своевременного использования изделий.

Различают три основных вида производства: единичное (индивидуальное), серийное (мелко- и крупносерийное) и массовое. Сложная радиоэлектронная аппаратура, например передвижные телевизионные станции, мощные радиопередающие устройства и т. п., изготавливаются, как правило, мелкими сериями.

Для мелкосерийного производства сложной радиоэлектронной аппаратуры различного назначения характерны следующие общие особенности:

1. В основу конструкции большинства современных изделий заложен принцип функционально-блочного (узлового) конструирования. Этот принцип является основным, так как он позволяет создавать предпосылки для широкого внедрения механизации и автоматизации при производстве аппаратуры. Кроме того, он позволяет сократить сроки проектирования радиоаппаратуры и освоение ее в производстве, повысить эксплуатационную надежность работы изделия, обеспечить хорошую взаимозаменяемость блоков, облегчить эксплуатацию и ремонт аппаратуры, а также дает возможность осуществить поблочную сборку, монтаж и регулировку изделий.

2. В качестве оснований блоков и изделия в целом используются нестандартные по форме, размерам и габаритам сварные из профильной стали или литые из силумина каркасы, шасси и рамы, обеспечивающие достаточную жесткость конструкции.

3. Наиболее распространенным способом крепления являются разъемные резьбовые соединения, в результате

чего крепежные детали в изделиях составляют до 50% общего количества всех деталей.

4. Компоновка изделий на шасси, каркасах и стойках отличается плотным размещением узлов, модулей и деталей, жгутовым межблочным монтажом с подключением отдельных блоков в общую схему с помощью разъёмов.

5. Большинство аппаратуры, выпускаемой мелкими сериями, имеет объёмный монтаж, который, как правило, выполняется ручным способом с применением монтажных проводов различных типов и марок.



# НАДЕЖНОСТЬ И ТЕХНОЛОГИЯ

### § 1. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ И ЗАДАННАЯ НАДЕЖНОСТЬ

Конструктивное совершенство радиоэлектронной аппаратуры определяется не только его эксплуатационными качествами, но и технологичностью конструкции, степенью трудоемкости подготовки производства и временем, необходимым для освоения изделия.

Под технологичностью конструкции радиоаппаратуры следует понимать такое качество комплектующих деталей, узлов и конструктивного исполнения изделия в целом, при котором возможно наиболее быстрое и экономичное освоение этого изделия в производстве, т. е. выпуск готовой продукции с минимальными затратами и высокой надежностью.

Конструкция изделия может считаться технологичной, если она полностью удовлетворяет требованиям эксплуатационной надежности, позволяет применять высокопроизводительные методы изготовления при минимальных затратах рабочей силы и наиболее низкой ее квалификации, а также рационально использовать оборудование, материалы и требует несложной подготовки производства.

Одной из основных особенностей требований технологичности конструкции радиоэлектронной аппаратуры, отличающей их от требований технологичности механических приборов, является то, что в них учитываются как условия производства, так и условия тесного взаимодействия механических элементов, характеризующих-

ся кинематическими, динамическими и статическими связями, и радиодеталей, свойства которых обусловлены электрическими и магнитными связями. Для производства сложной радиоэлектронной аппаратуры характерным является изменение серийности в зависимости от производства блоков, приборов, систем. Серийность уменьшается к сборке системы. Например, производство электронно-вычислительных машин на этапах сборки узлов, блоков надо рассматривать как массовое или крупносерийное, а на этапах сборки системы, т. е. всей машины — как мелкосерийное и в некоторых случаях единичное.

Уровень технологичности конструкции радиоэлектронных систем, которого добиваются при отработке опытного образца, зависит от масштаба производства. Конструкция, технологичная для единичного производства, может оказаться совершенно непригодной для серийного или массового производства, поэтому не следует говорить о технологичности вообще. Оценивая надежность конструкции с точки зрения ее технологичности, необходимо исходить из уровня техники производства и требуемой степени точности изготовления.

Причины отказов, возникающих при эксплуатации сложной радиоэлектронной аппаратуры и зависящих только от производственных причин, распределяются по основным технологическим процессам приблизительно следующим образом [11]:

- погрешности предварительного производства 2,5%
- низкое качество технологической документации и плохая механическая сборка . . . . . 15,0%
- ошибки в электрическом монтаже . . . . . 80,0%
- плохая настройка . . . . . 2,5%

Интересно отметить, что иногда из всего брака, происходящего на сборочный процесс, 75% отказов происходит из-за покупных комплектующих элементов и только 25% — за счет погрешностей сборки.

При анализе отказы, приводящие к нарушению выполнения сложными радиоэлектронными устройствами своих функций из-за погрешностей проектирования и производства, удобно разбивать на три группы:

— внезапные необратимые отказы, вызываемые устойчивым нарушением физических свойств какого-либо элемента аппаратуры. Например механические по-

вреждения, электрический пробой, замыкание, нарушение контакта и т. п.;

- постепенные отказы, вызываемые старением элементов радиоаппаратуры и приводящие к уходу ее выходных параметров за пределы технических требований;

- отказы, вызываемые тем, что под влиянием внешних условий (температуры, влажности, вибрации и т. д.) в аппаратуре происходят обратимые изменения характеристик радиодеталей, входящих в аппаратуру, в результате чего ее выходные параметры уходят за нормы технических требований. После прекращения действия этих дестабилизирующих факторов характеристики радиодеталей возвращаются к первоначальному значению.

Широко известны следующие способы уменьшения возникновения перечисленных групп отказов:

- облегчение условий использования аппаратуры (применение искусственного отвода тепла, герметизация, создание микроклимата и др.);

- облегчение электрических режимов использования радиоэлементов (снижение напряжений, мощности, и т. п.);

- применение резервирования;

- проведение профилактических работ, во время которых производится замена деталей, имеющих признаки неисправности, и выполняются регулировочные работы, компенсирующие необратимые изменения характеристик деталей.

Степень проявления и влияния этих отказов зависит от уровня техники и точности каждого конкретного производства. Чем ниже трудоемкость, выше степень механизации и автоматизации технологических процессов производства, тем лучше достигается требуемая точность изготовления аппаратуры, а следовательно, и заданный уровень эксплуатационной надежности. Рассмотрим основные технологические процессы, которые приводят к наибольшему проценту отказов радиоэлектронных устройств в условиях эксплуатации.

Изготовление современной сложной радиоэлектронной аппаратуры по своей трудоемкости может быть распределено между следующими основными работами:

- сборочно-монтажными;
- механическими;

- регулировочными;
- заготовительными;
- отделочными.

В процессе изготовления радиоэлектронной аппаратуры особенно трудоемкими являются сборочно-монтажные работы, занимающие в некоторых случаях до 50% от общей трудоемкости. Очевидно, что именно здесь скрыта основная причина высокого процента отказов по вине производства.

В настоящее время вопрос оценки производственных факторов, понижающих точность и надежность радиоэлектронной аппаратуры, недостаточно изучен и практически еще не нашел достаточного отражения в литературе. Тем не менее, можно предположить, что к таким факторам относятся: пайка, сварка, пропитка, заливка, обволакивание и прочие технологические процессы сборочно-монтажных работ. Поэтому, учитывая небольшой объем книги, рассмотрим лишь операции сборки и монтаж с точки зрения влияния их на эксплуатационную надежность сложной радиоэлектронной аппаратуры при мелкосерийном производстве.

*Сборкой* называется процесс соединения отдельных деталей и материалов в сборочные узлы, блоки, приборы и системы, которые в свою очередь собираются в изделие, годное к использованию. Сборка делится на две группы:

- а) неразъемная (выполняется пайкой, сваркой, склеиванием, склепыванием и т. д.);
- б) разъемная (выполняется с помощью винтов, болтов, гаек, шпилек, шпонок и т. д.).

Основными рабочими документами для выполнения различных сборок согласно междуведомственной нормали «Система чертежного хозяйства» (СЧХ) являются сборочные чертежи на узлы, приборы, системы и изделия, а также на блоки, которые представляют собой промежуточные сборочные единицы. При мелкосерийном производстве сложной радиоэлектронной аппаратуры следует предъявлять особые требования к качеству технологических карт, разрабатываемых на основе конструкторских чертежей. Несвоевременность поступления технологических карт на сборочные участки и количество допущенных в них ошибок являются причинами производственных погрешностей сборки узлов и блоков,

приводящих к различного рода неисправностям и отказам в условиях эксплуатации.

Технологические карты, обрабатываемые при контрольных сборках и разборках, должны предусматривать:

- особенности конструкции собираемого узла или блока;

- последовательность сборочных операций, удобную для выбранного метода сборки и исключающую последующую подгонку и механическую доделку собираемых деталей и узлов;

- полную информацию по выполняемым операциям и применяемому инструменту.

*Электрическим монтажом* называется совокупность рабочих приемов, при помощи которых осуществляется электрическое соединение функциональных элементов, входящих в состав узлов, блоков, приборов, систем и изделий, в соответствии с принципиальной электрической или электромонтажной схемой. Электрический монтаж в рамках промышленных предприятий, производящих радиоаппаратуру, сокращенно называется монтажом. Этот термин и используется при дальнейшем изложении.

Основным рабочим документом для выполнения и проверки внутреннего электрического монтажа прибора, блока, системы, изделия при мелкосерийном производстве является электромонтажная схема, исполненная конструктивным способом. Эта схема графически должна изображать действительное расположение электрических элементов и монтажных проводников, а также содержать все необходимые указания по производству монтажа.

Следует иметь в виду, что электромонтажная схема (СхМ) позволяет в условиях производства наглядно оценить эксплуатационные свойства изготавливаемого блока, его ремонтпригодность. Электромонтажная схема составляется на основании принципиальной электрической схемы, сборочного чертежа и опытного (эталонного) образца. В ней должно учитываться электрическое взаимодействие отдельных элементов схемы, а также взаимодействие отдельных электрических цепей, кроме того, решается рациональное размещение деталей, узлов, отдельных проводников и жгутов. Оптимальный вариант монтажной схемы с точки зрения эксплуатационной на-

дежности изделия должен обеспечивать отсутствие электрических влияний (наводок), удобный доступ ко всем элементам схемы и местам электрических соединений, а также надежное крепление всех элементов схемы.

Специфичность изготовления радиоаппаратуры заключается в том, что сборочные работы могут или предшествовать электрическому монтажу, или же объединяться с ним в единый процесс сборки-монтаж.

Такой единый процесс широко используется на поточных линиях. В этом случае одновременно с электрическим монтажом выполняются разнообразные работы, связанные с установкой различных функциональных деталей и узлов: конденсаторов, резисторов, контуров, переключателей, жгутов и т. д. Последовательность выполнения сборочных работ подчиняется намеченному порядку осуществления монтажных работ и устанавливается в соответствии с оптимальным решением технологического процесса сборки-монтаж.

При монтаже радиоаппаратуры, выпускаемой мелкими сериями, в настоящее время применяется большая номенклатура проводов, шнуров и кабелей, отличающихся не только наименованием (более 60), но и сечением. В современном сложном изделии применяются 35—70% намоточных и монтажных проводов марок ЛМВГ, ЛПРГС, МГШВ, БПВЛЭ, ПМОВ, ПМЛ и ПВЛ от их общей номенклатуры. Часто в одном изделии один и тот же монтажный провод имеет от двух до пяти сечений. В некоторых изделиях используется до 20 наименований проводов порядка 60 различных сечений. Такое многообразие проводов и кабелей приводит к широкому разнообразию способов их нарезки и разделки концов, что влечет за собой повреждение центральных жил, экранов, затрудняет условия распайки и крепежа.

Для уменьшения влияния технологических операций разделки монтажных проводов, шнуров и кабелей на возникновение отказов при эксплуатации аппаратуры необходимо предельно ограничивать номенклатуру проводов и кабелей в мелкосерийном производстве как по количеству применяемых марок, так и по количеству сечений во всех изделиях. Это в свою очередь создаст условия широкого внедрения механизированного оборудования и станков для резки и разделки монтажных про-

водов и кабелей, повысит качество и снизит трудоемкость монтажных работ.

Анализ выпускаемых радиопромышленностью изделий и блоков показывает, что очень часто аналогичные по назначению и наименованию блоки и изделия выполняются по различным принципиальным схемам, имеют различное конструктивное исполнение и различные варианты компоновки. Это объясняется главным образом тем, что изделия разрабатываются несколькими предприятиями и часто без учета возможности унификации и нормализации целого ряда узлов и блоков и без использования уже имеющихся технических решений по ряду вопросов.

Анализ технологических процессов сборки и монтажа радиоэлектронной аппаратуры показывает, что весь процесс содержит до пятидесяти элементарных переходов. Однако только пять из них, имеющих наибольшую трудоемкость сборочно-монтажных работ, в первую очередь должны рассматриваться как источники возможных отказов, возникающих в эксплуатируемой аппаратуре по вине сборочно-монтажных работ:

- 1) пайка провода, радиоэлемента;
- 2) заделка вывода провода, радиоэлемента и т. д.;
- 3) установка детали, узла;
- 4) крепление винтом;
- 5) крепление винтом с гайкой.

Каждая некачественная пайка — это потенциальный отказ в условиях эксплуатации из-за нарушения контакта. Но и при соблюдении правил применяемой технологии пайки неизбежен нагрев радиодеталей со всеми вытекающими отсюда последствиями: уходом параметров, порчей изоляции и т. п. Таким образом, само существование пайки уже известным образом снижает точность и уменьшает надежность изготавливаемой аппаратуры.

Уменьшения влияния качества пайки на интенсивность отказов радиоаппаратуры можно достигнуть за счет пайки сваркой, осуществляемой электронным лучом. Надежность соединений в этом случае увеличивается, а температурное влияние на параметры соединенных радиоэлементов сводится к минимуму. Температура, подлучаемая в точке сварки лучом, составляет  $4\,500^{\circ}\text{C}$ , причем на расстоянии уже десятых долей миллиметра от места сварки температура резко падает и приближает-

ся к комнатной, в то время как при пайке с помощью паяльника, при максимальной температуре пайки 250—300° С, распространение тепла может превышать сантиметры.

Другой путь уменьшения трудоемкости пайки и субъективного влияния на ее качество монтажника заключается в применении методов механизации и автоматизации операций пайки и разделки проводов — замена объемного навесного монтажа печатным. Применение печатного монтажа сокращает расход монтажных проводов до 50% и за счет механизированной пайки целиком печатных плат снижает трудоемкость монтажных работ более чем на 40%.

Кроме того, применение печатных схем позволяет сохранить принцип блочного конструирования, осуществить поблочную сборку, монтаж и регулировку, а при дальнейшем развитии полупроводниковой техники обеспечить создание надежных модульных конструкций. Микроминиатюризация деталей, разбивка радиоэлектронных устройств на унифицированные узлы нормированной надежности, выполняющие самостоятельные функции при автоматизации их изготовления, резервирование — вот три основных направления повышения надежности сложных радиоэлектронных систем на базе печатных схем.

Однако следует иметь в виду, что конструкции, выполненные печатным способом, помимо свойств, обеспечивающих их надежную эксплуатацию в особо тяжелых условиях, т. е. малый вес, минимальные габариты, высокая механическая прочность и стойкость в отношении тряски, вибрации и больших величин ускорений, требуют надежной защиты от влаги окружающей среды. С этой целью применяются литьевые полиэфирные, полуретановые, эпоксидные и другие смолы и компаунды. Из них широкое применение получил компаунд марки МБК-1, позволяющий заливать узлы и блоки без нагрева.

Трудоемкость операций установки узлов и деталей с укладкой шайб и лепестков, с совмещением мест крепления данного узла и установкой элементов крепления составляет 19,3% трудоемкости сборочно-монтажных работ. Большая величина ее обусловлена тем, что вся установка узлов и радиоэлементов при мелкосерийном производстве осуществляется вручную, часто при недоста-



точно точном их изготовлении. В этом тоже следует искать причины неисправностей, появляющихся в процессе эксплуатации.

Механизированная установка и крепление узлов затруднены большим разнообразием самого характера переходов на этой операции и экономически не оправдана масштабами производства. Помимо крепления с помощью винтов и гаек могут иметь место операции крепления с помощью различных склеивающих веществ, которые должны удовлетворять самым разнообразным эксплуатационным требованиям. Кроме того, большинство таких узлов, как трансформаторы, фильтры промежуточной частоты, контуры, потенциометры и другие, имеют часто большие габаритные размеры или вес и сложные конструктивные формы, не отвечающие требованиям механизированной установки. При мелкосерийном производстве уровень механизации сборки радиоаппаратуры остается пока еще низким и основной объем сборочных работ выполняется вручную с использованием элементарного инструмента.

Для широкого внедрения средств механизации сборочных работ, направленных на повышение надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры в процессе производства, необходимо:

- унифицировать размеры и геометрические формы устанавливаемых элементов и узлов;
- провести типизацию видов крепления;
- наладить централизованное изготовление средств «малой» механизации.

К числу факторов, влияющих на безотказность радиоаппаратуры и тормозящих механизацию сборочно-монтажных работ следует отнести наличие доделочных и подгоночных работ. Особенно велики они при механической сборке. Доделочные работы усложняют сборку, затрудняют ее механизацию, снижают требуемую точность изготовления. Для уменьшения трудоемкости доделочных работ при сборке радиоаппаратуры, выпускаемой мелкими сериями, необходимо повышать технологичность конструкции узлов и блоков, а также переводить такие работы в механические и заготовительные цехи.

Наряду с механизацией и автоматизацией заготовительных и сборочно-монтажных работ важной задачей является широкое внедрение в мелкосерийное производ-

ство радиоаппаратуры различных поточных методов. Наибольшее распространение в цехах общей сборки аппаратуры, выпускаемой мелкими сериями, в настоящее время получила поточная сборка и монтаж со свободным ритмом и ручной передачей изделий с одного рабочего места на другое. Причем в большинстве случаев на поточной линии вначале сконцентрированы почти все сборочные работы, а затем уже монтажные, после которых следует небольшая группа операций окончательной сборки и регулировки. При такой организации состав работ на каждом рабочем месте становится более однородным, что создает предпосылки к уменьшению производственных погрешностей и повышению производительности труда. Использование поточных линий со свободным ритмом обусловлено трудностями применения принудительного ритма при малых сериях.

При производстве радиоаппаратуры на печатных платах, т. е. более технологичных конструкций, надежность сборочно-монтажных работ, их трудоемкость определяется примененным методом сборки.

В процессе осуществления сборочно-монтажных работ производится технический контроль качества и надежности выполнения сборок, узлов, блоков, элементов монтажной схемы (например, жгутов) и всего изделия в целом, что должно сводиться к следующим контрольным операциям:

- проверке точности механического соединения и крепления деталей в узлах, узлов в блоках и блоков в системах;

- проверке механической прочности, а также качества паяк и сварок;

- проверке качества изоляции;

- проверке соответствия электрических соединений принципиальной схемы;

- проверке статического и динамического режимов работы отдельных узлов, блоков и системы в целом.

Проверка прочности механических соединений, крепления деталей, жгутов и узлов в блоке, прочности паяк и сварки производится визуально, вручную инструментом (например, пинцетом или отверткой, плоскогубцами, в случае разъемных сборок), а также на вибростендах и платформах для испытаний на тряску и удары. Одновременно с этим проверяется внешний вид паяк и сварок,

причем проверенные пайки и резьбовые соединения закрашиваются. Следует иметь в виду, что трудоемкость закраски паек значительно снижается при переходе на печатный монтаж.

Проверка сложных монтажных схем посредством пробника, тестера и омметра занимает много времени, но может быть допущена в отдельных случаях при единичном и мелкосерийном производстве радиоаппаратуры. При дальнейшей унификации узлов и блоков сложных радиоэлектронных устройств следует заключительный контроль монтажа изделия производить с помощью приборов-автоматов. В настоящее время на измерение одной цепи с помощью применяемых приборов, в которых включение отдельных цепей в различные схемы осуществляется шаговым искателем и системой реле, затрачивается в среднем не более 1 сек. Надежность контрольных операций, выполняемых приборами-автоматами и эталонными стендами по проверке токов и напряжений на электродах ламп, значительно выше, чем в случае выполнения их человеком.

На основании изложенного можно сделать вывод, что для обеспечения эксплуатационной надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры, выпускаемой мелкими сериями, следует широко внедрять механизацию и автоматизацию основных технологических процессов производства, для чего необходимая технологичность конструкции должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Для каждого изделия номенклатура монтажных и намоточных проводов, кабелей и шнуров по их наименованию и сечению должна быть сокращена до минимума, при котором сохраняются эксплуатационные параметры.

2. Размеры и виды разделки концов проводов и кабелей должны быть систематизированы с целью определения типовых видов разделки и стандартных ее размеров.

3. Технологический процесс зачистки концов многожильных монтажных проводов типов МГШВ, ПМВГ, БПВЛ и других от изоляции должен исключать подрезку токоведущих жил провода.

4. Необходимо пересмотреть существующие виды и размеры формовок с целью создания нормали типовых

видов формовок радиоэлементов с осевыми и радиальными, плоскими и проволочными выводами для обязательного применения при разработке радиоэлектронной аппаратуры.

5. Количество типоразмеров конденсаторов и сопротивлений в узлах и блоках аппаратуры, выпускаемой мелкими сериями, должно быть по возможности сокращено.

6. Разнообразие резьбовых крепежных соединений для механического крепления деталей, узлов и блоков радиоаппаратуры должно быть сокращено путем разработки типовых способов крепления. Кроме того, конструктивное выполнение креплений деталей, узлов и блоков должно предусматривать более широкое применение электромеханического и пневматического инструмента.

7. Узлы и радиоэлементы аппаратуры широкого применения (трансформаторы, контуры высокой и промежуточной частоты, ламповые панели и т. д.) должны быть унифицированы и нормализованы с организацией их централизованного изготовления на специализированных предприятиях с высокомеханизированным производством, прогрессивными технологическими процессами и более совершенной организацией труда.

8. компоновка узлов и блоков на шасси должна быть выполнена с минимальным количеством межблочных соединений и предусматривать удобство сборки и монтажа с помощью инструмента и средств механизации.

9. Конструктивное выполнение жгутов и технология их вязки должна предусматривать применение прогрессивных технологических приемов (склеивание, заливку, опрессовку и т. д.).

10. В конструкциях сложной радиоэлектронной аппаратуры необходимо шире использовать функционально-блочный метод конструирования с применением последних достижений науки и техники (микромодули, печатные схемы и т. д.).

11. Конструкция радиоэлектронной системы должна допускать выполнение сначала всех сборочных операций, а затем монтажных и регулировочных для последовательного выполнения их на поточных многопредметных линиях с группировкой однотипных технологических операций.

12. Существующий замкнутый цикл производства целесообразно заменить системой специализированных участков сборки, монтажа и регулировки с последующей организацией многопредметных поточных линий.

13. Объемный монтаж аппаратуры, выпускаемой мелкими сериями, следует заменить плоскостным, обеспечивающим выполнение технологии механизированной подготовки радиоэлементов, их крепления и пайки схемных соединений групповым способом.

14. На каждом предприятии технологический процесс на заготовку монтажных проводов и кабелей, изоляционных материалов, радиоэлементов, полуфабрикатов и другие заготовительные работы должны выполняться централизованно на специализированном участке для всей номенклатуры выпускаемых изделий.

Повышение уровня технологии мелкосерийного производства сложной радиоэлектронной аппаратуры и осуществление механизации и автоматизации следует рассматривать как комплексную задачу, направленную на снижение интенсивности отказов аппаратуры в период нормальной эксплуатации и охватывающую вопросы конструирования аппаратуры, организации производства и разработки производительных средств механизации, автоматизации и прогрессивных технологических процессов.

## **§ 2. УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА — ОСНОВА ВЫСОКОНАДЕЖНОЙ АППАРАТУРЫ**

Себестоимость и время, затрачиваемое на изготовление радиоаппаратуры, ее надежность и простота производства зависят от технологии. Насколько всесторонне и полно разработана технология изготовления каждого конкретного изделия, настолько эффективны усилия всего коллектива завода, направленные на организацию производственного процесса с целью повышения производительности труда, увеличения выпуска изделий с единицы производственной площади, на снижение себестоимости продукции и повышение надежности радиоаппаратуры с тем, чтобы она работала безотказно даже в самых неблагоприятных условиях эксплуатации.

Для обеспечения требуемого уровня эксплуатационной надежности и одновременно рационального построения процесса изготовления радиоэлектронной аппарату-

ры, прежде всего необходимо иметь четкое представление об исходных принципиальных понятиях производственного и технологического процессов.

Производственным процессом называют совокупность действий, в результате которых сырье, материалы или полуфабрикаты, поступающие на завод, превращаются в готовую продукцию.

Производственный процесс включает в себя не только непосредственные действия, направленные на изменение форм и свойств обрабатываемых деталей и сборку из них приборов, но и все необходимые для осуществления этих действий вспомогательные факторы, например подготовку производства, материально-техническое снабжение, ремонт оборудования, цеховой и внутризаводской транспорт и т. п. Соответственно этому производственный процесс и цехи, занятые в процессе производства, подразделяют на основные и вспомогательные.

Технологическим процессом называют часть производственного процесса, непосредственно связанного с последовательной сменой состояний продукта производства.

Разработка и внедрение в производство высокопроизводительных и экономичных технологических процессов изготовления радиоэлектронной аппаратуры, систематическое совершенствование уже освоенных технологических процессов, проектирование и изготовление технологического оснащения, рациональное размещение оборудования — основные вопросы, которые должны решаться соответствующими службами завода, для поддержания современного уровня технологической подготовленности производства.

Наиболее типичными технологическими процессами при производстве радиоаппаратуры являются: механическая сборка, электрический монтаж, настройка и регулировка, технический контроль, литье, штамповка, механическая обработка и т. п.

Каждый технологический процесс, а также вспомогательные факторы производственного процесса, в меру своего участия в изготовлении выпускаемой радиоаппаратуры сказывается на ее эксплуатационной надежности. В некоторой степени можно обеспечить надежность выпускаемого изделия, требуемую по техническим усло-

виям, за счет качественного технического контроля. При этом, чтобы сделать планирование выпуска готовой продукции возможным технологический процесс производства должен быть управляем на всех своих этапах. Технолог должен знать, что он получит в результате данного технологического процесса и с какой точностью.

Управляемость технологического процесса прежде всего предусматривает его стабильность, а также возможность компенсации производственных погрешностей (или отклонений) одних параметров другими. Стабильность технологического процесса в известной мере зависит от технологичности конструкции изделия и связана с требуемой точностью изготовления. Таким образом, управляемость технологического процесса, а следовательно, и эксплуатационная надежность выпускаемой радиоаппаратуры, зависят от точности производства.

Из статистических данных известно, что разброс параметров схемных элементов в конце срока службы радиоэлектронной аппаратуры обычно в несколько раз превышает разброс параметров в начале ее эксплуатации. Так, например, одновременное воздействие климатических и рабочих условий (температура, влажность, напряжение, старение, давление и т. п.) на композиционные сопротивления приводят к увеличению отклонения от номинального значения с  $\pm 5$  до  $\pm 20\%$ . Это обстоятельство влечет за собой снижение точности выходных параметров, а следовательно, и надежности радиоаппаратуры.

Из сказанного видно, что надежность радиоэлектронной аппаратуры в сложных условиях эксплуатации за счет эффективности управления тем или иным технологическим процессом можно обеспечить повышением точности производства путем расширения поля электрических допусков на параметры схемных элементов и электронных цепей, учитывающих производственный разброс, старение и воздействие температуры.

Под электрическими допусками на радиоэлектронную аппаратуру и ее компоненты следует понимать те пределы, в которых должны находиться их электрические параметры при удовлетворении технических условий на аппаратуру в целом.

Учет старения и температуры при расчете электрических допусков неизбежно приводит к необходимости

уменьшения (сужения) производственного разброса параметров схемных элементов и ламп.

Под производственными погрешностями следует понимать разного рода отступления от номинальных данных, указанных в чертежах, нормалях, технических условиях и другой технической документации. Производственные погрешности деталей, узлов, выходных параметров блоков и систем следует рассматривать как следствие влияния нестабильности технологических процессов изготовления радиодеталей, сборки, монтажа, регулировки и т. п.

К причинам, вызывающим производственные погрешности, следует отнести:

- дефекты технологического оборудования (деформации деталей станка, инструмента, неравномерность хода и люфты в управляющих механизмах, неточность шкал, лимбов и т. п.);

- методические погрешности, которые присущи данному методу обработки детали или электрической настройки узла (например, при фрезеровании зубчатых колес методом обкатки эвольвента зуба заменяется всяма близкой к ней ломаной линией, а настройка линейки УПЧ может производиться в дискретных точках в пределах полосы пропускания);

- колебания режимов при намотке катушек индуктивности, пропитке, сушке, электротренировке и т. п.;

- неоднородности исходных материалов, погрешности измерительных инструментов и приборов, ошибки рабочего персонала.

Производственные погрешности можно классифицировать по различным признакам. Так как погрешности являются следствием технологического процесса, то их прежде всего следует классифицировать по виду технологического процесса, например погрешности прессования, намотки, сборки, монтажа и т. п. Можно также рассматривать производственные погрешности, относя их к операциям технологического процесса. Зная, например, суммарную погрешность изготовления электронного блока, можно составить представление о производственных погрешностях, относящихся к отдельным операциям технологического процесса его изготовления.

Любая радиоэлектронная аппаратура, независимо от степени сложности, по существу представляет собой со-



вокупность ламп, полупроводников, резисторов, конденсаторов, трансформаторов, переключателей и т. п. Производственные погрешности этих элементов электрической схемы будут определять выходные параметры аппаратуры, их разброс от заданных значений. Поэтому, в первую очередь, при анализе точности радиоэлектронной аппаратуры, следует обращать внимание на производственные погрешности входящих комплектующих элементов.

Прежде чем перейти к рассмотрению оценки выбора производственных допусков на выходные параметры конкретного электронного блока, учитывающего влияние производственных погрешностей, температуры и старения на обеспечение заданного уровня эксплуатационной надежности радиоаппаратуры, целесообразно вспомнить основной закон распределения производственных погрешностей.

С достаточной степенью точности на практике можно предположить, что:

- производственная погрешность представляет собой сумму частных погрешностей, которые вызываются действием большого числа случайных и некоторого числа систематических первичных факторов;

- не изменяются во времени число случайных факторов и параметры вызванных ими частных погрешностей;

- среди частных погрешностей нет доминирующих, т. е. все случайные факторы по своему влиянию на общую погрешность составляют величины одного порядка;

- все случайные факторы взаимно независимы, что является характерным для тех случаев, когда рабочий не имеет возможности влиять на работу оборудования в процессе изготовления и настройки, т. е. при автоматически работающем оборудовании;

- для всех экземпляров изделий остаются одинаковыми как число систематических факторов, так и значения вызванных ими частных погрешностей.

При выполнении приведенных выше допущений имеет место наиболее часто встречающееся распределение производственных погрешностей, известное в теории вероятностей под названием закона Гаусса или нормального распределения (рис. 2.1). Математическое выражение

его записывается в следующем виде:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{[x-M(x)]^2}{2\sigma^2}},$$

где  $f(x)$  — ордината кривой распределения;

$x$  — отклонение от центра группирования или величины измеряемого параметра;

$\sigma$  — среднеквадратическое отклонение, являющееся мерой рассеивания отклонений;

$M(x)$  — среднее значение или координата центра группирования отклонений.

Характерным для данного закона распределения является плотное сосредоточение отклонений (или погреш-

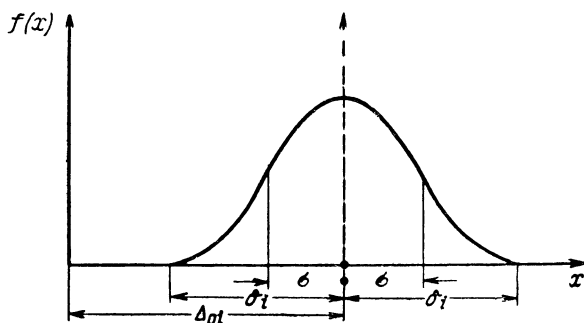


Рис. 2.1. Характеристики поля допусков на кривой распределения по закону Гаусса.

ностей) около центра группирования и медленное симметричное уменьшение количества отклонений по мере увеличения их расстояния в обе стороны от центра группирования. Под влиянием систематических причин «палатка» Гаусса может сместиться на величину  $\Delta x (\Delta_{oi})$ , не изменяясь по своей форме.

Кривая номинального распределения является своего рода индикаторной диаграммой технологического процесса и таким образом позволяет давать объективную оценку его качества. Другими словами, кривая нормального распределения позволяет судить о стабильности технологического процесса, фиксировать его нарушения, дает представление о влиянии технических изменений, а также в ряде случаев позволяет устанавливать причи-

ны нарушений процесса. Вместе с тем, пользуясь кривой нормального распределения, можно определить количество возможного брака и соответствие между назначенным допуском и точностными возможностями технологического оборудования.

Допуск определяет максимально допустимое отклонение заданного значения выходного параметра. Для обеспечения заданного допуска в условиях производства необходимо, чтобы поле рассеяния производственных погрешностей не выходило за границы поля допуска. Отсюда вытекает основное требование к сборке и настройке оборудования, которое сводится к тому, чтобы центр группирования производственных погрешностей располагался как можно ближе к середине поля допуска (рис. 2.1). Основными характеристиками поля допуска являются:  $\Delta_{0i}$  — координата середины поля допуска  $i$ -го параметра относительно номинального значения и  $\delta_i$  — половина абсолютной величины поля допуска  $i$ -го параметра. Если за начало координат взять номинальное значение выходного параметра, то это требование к настройке можно записать в виде

$$M_i(x) = \Delta_{0i}.$$

Для оценки выполнения в условиях производства заданных при проектировании требований в отношении номинального значения и допустимых отклонений необходимо знать основные параметры кривой распределения погрешностей, а именно:  $M(x)$  и  $\sigma$ .

Любой узел, блок или система радиоэлектронной аппаратуры обычно характеризуются одним или несколькими параметрами, величины которых в процессе производства имеют разброс, обусловливаемый нестабильностью технологических процессов изготовления, сборки и монтажа. К основным источникам погрешностей электронных цепей следует отнести:

- отклонения фактических величин параметров ламп и полупроводниковых приборов от их расчетных значений в данной рабочей точке;

- отклонения фактических величин емкостей, индуктивностей и резисторов от их номинальных значений;

- дополнительные малые проводимости, емкости и индуктивности, получаемые при монтаже радиоэлектронной схемы (монтажные паразитные параметры);

— отклонения напряжений источников питания от расчетных значений.

Отклонения напряжений источников питания от расчетных значений в основном вызваны отклонениями от «номинальных значений» параметров элементов, входящих в схему выпрямителя (ламп, кристаллических диодов, индуктивностей фильтров и т. д.), т. е. погрешность напряжения трех и более составляющих звеньев. В этом случае закон распределения погрешностей напряжения источников питания в пределах поля допуска должен быть близок к нормальному.

Для определения разбросов или производственных погрешностей параметров необходимо прежде всего иметь их аналитические выражения. В самом общем случае выражение параметра узла, блока и системы будет являться функцией нескольких величин, значения которых определяются параметрами входящих комплектующих элементов. Аналитическое выражение параметра в общем виде может быть представлено следующим образом:

$$N = f(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n),$$

где  $N$  — параметр узла, блока, системы;

$q_n$  — параметры входящих элементов.

Зависимость между производственной погрешностью выбранного параметра блока и производственными погрешностями входящих в цепь этого параметра элементов при сделанных выше допущениях [8] можно записать:

$$\frac{\Delta N}{N} = A_1 \frac{\Delta q_1}{q_1} + A_2 \frac{\Delta q_2}{q_2} + \dots + A_i \frac{\Delta q_n}{q_n},$$

где  $A_1, A_2, \dots, A_n$  — коэффициенты перед производственными погрешностями параметров входящих элементов, которые зависят от самих величин  $q_1, q_2, \dots, q_n$  и от характера связи между ними. Для конкретных узлов, блоков и систем при заданных номинальных значениях коэффициенты  $A_1, A_2, \dots, A_n$  могут иметь определенное числовое выражение, которое будет характеризовать влияние (или «вес») каждого элемента на параметр.

Итак, используя данное выражение в каждом конкретном случае, можно рассчитать величину производст-

венных погрешностей параметра при заданных значениях входящих элементов.

Известно, что величина параметра каждого схемного элемента является функцией температуры, и в случае линейных изменений параметра под воздействием температуры его величина может быть представлена в следующем виде:

$$q = q_0 [1 + \alpha (t_2 - t_1)],$$

где  $q_0$  — величина параметра при температуре  $+20^\circ \text{C}$ ;  
 $\alpha$  — температурный коэффициент (ТК) данного параметра, представляющий собой относительное изменение параметра  $(\Delta q/q_0)$  при нагревании элемента на  $1^\circ \text{C}$ ;  
 $t_1$  и  $t_2$  — соответственно начальная и конечная температуры.

Для получения зависимости погрешности выходного параметра от изменений окружающей температуры необходимо в исходное уравнение выходного параметра

$$N = f(q_1, q_2, \dots, q_n),$$

представить параметры элементов схемы, меняющиеся под влиянием температуры, тогда получим

$$N = f(q_1, q_2, \dots, q_n, t).$$

После необходимых математических преобразований [8] получаем уравнение относительной погрешности выходного параметра

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f(q_1, q_2, \dots, q_n)} \cdot \left( \frac{\Delta q_i}{q_i} + \alpha \Delta t \right),$$

где  $d_i$  — ТК  $i$ -го параметра;  
 $\Delta t = (t - 20)^\circ \text{C}$  — максимально возможный перепад температур между крайней и нормальной температурами заданного температурного диапазона.

Второе слагаемое полученного выражения представляет собой уравнение температурной погрешности вы-

ходного параметра электронной цепи и записывается в виде

$$\left[ \frac{\Delta N}{N} \right]_T = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f(q_1, q_2, \dots, q_n)} \cdot \alpha_i \right] \Delta t.$$

Учет влияния температурного воздействия на радиоэлектронное устройство сводится к определению ТК выходного параметра цепи и максимально возможной погрешности (температурного допуска) при заданном технических условиях перепада температур. Считая ТК выходного параметра электронной цепи случайной величиной, из выражения температурной погрешности получаем формулы для определения его основных численных характеристик;

а) для среднего значения ТК

$$M(\alpha_\Sigma) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f(q_1, q_2, \dots, q_n)} \right] \times \\ \times [\Delta(\alpha_i) + \alpha_i \delta(\alpha_i)];$$

б) для половины поля допуска ТК

$$\delta(\alpha_\Sigma) = \frac{1}{K_\Sigma} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f(q_1, q_2, \dots, q_n)} \right]^2 K_i^2 \delta^2(\alpha_i)},$$

где  $\Delta(\alpha_i)$  — координата середины поля допуска ТК  $i$ -го параметра;

$\alpha_i$  — коэффициент относительной асимметрии распределения ТК в заданных пределах (в поле допуска);

$K_i$  — коэффициент относительного рассеивания ТК  $i$ -го параметра;

$\alpha_i$  — температурный коэффициент  $i$ -го параметра, равный относительному отклонению параметра при нагревании на  $1^\circ\text{C}$ ;

$\delta(\alpha_i)$  — половина поля допуска ТК  $i$ -го параметра.

В отличие от расчета производственных допусков обычно пользуются законами распределения погрешности параметров, а середину поля допуска  $\Delta(\Delta q_i)$  счита-

ют равной нулю, при расчете температурных допусков пользуются распределением температурных коэффициентов, а не погрешностей ТК. Поэтому середина поля допуска того или иного ТК  $\Delta(\alpha_i)$  может быть и не равна нулю.

Рассчитав допуск и среднее значение ТК выходного параметра электронной цепи, можно определить предельное значение ТК из очевидного соотношения

$$\alpha_{\Sigma \text{ пред}} = M(\alpha_{\Sigma}) \pm \delta(\alpha_{\Sigma}).$$

После определения предельного значения ТК  $\alpha_{\Sigma \text{ пред}}$  указанным методом рассчитывается величина температурного допуска выходного параметра цепи

$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \alpha_{\Sigma \text{ пред}} \Delta t.$$

Другим фактором, который необходимо обязательно учитывать при отработке требуемой степени точности изготовления радиоэлектронной аппаратуры для обеспечения ее высокой эксплуатационной надежности, является старение схемных элементов. Процесс старения радиоэлементов является следствием необратимых изменений, происходящих в них с течением времени. Причиной этих изменений являются разнообразные физико-химические процессы, вследствие чего старение элементов имеет сложный характер, зависящий как от типа элемента, его конструкции, так и от условий, в которых он находится.

Процесс старения в основном сводится к различным изменениям параметров схемных элементов радиоаппаратуры: росту величины углеродистых сопротивлений, уменьшению емкости электролитических конденсаторов, потере эмиссионной способности радиоламп и т. п. Эти изменения в элементах происходят и тогда, когда они не работают, т. е. находятся под действием тока или напряжения, и даже тогда, когда хранятся в идеальных условиях. Разница заключается лишь в скорости процессов старения. Поэтому следует учитывать влияние на элементы радиоэлектронной аппаратуры не только времени их работы в схеме, но и времени хранения, т. е. полного срока их существования (рис. 2.2) [8].

Из приведенного рисунка видно, что окружающая среда и условия хранения оказывают весьма существен-

ное влияние на процесс старения элементов. Даже параметры элементов одного типа могут иметь различные законы изменения во времени, если условия их эксплуатации различны.

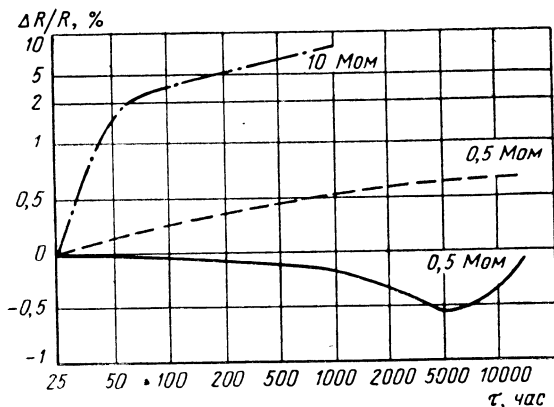


Рис. 2.2. Старение сопротивлений типа ВС-0,5 в различных условиях:  
 — при складском хранении; — — — в полевых условиях; - · - · - при повышенной влажности.

Это обстоятельство затрудняет учет старения элементов при анализе точности работы схемы, прогнозирование отказов и объективное установление сроков регламентных работ, уменьшает количество регулировок, т. е. затрудняет повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры.

Следовательно, одним из путей повышения эксплуатационной надежности радиоаппаратуры является обоснованный выбор допусков на элементы схемы каждого блока, узла или системы с учетом их старения на основе расчета электрических допусков.

В общем виде изменение параметра схемного элемента можно представить так:

$$q = q_0(1 + C\Delta\tau),$$

где  $\Delta\tau$  — полное время существования данного элемента, включая его хранение и предполагаемый срок работы в схеме прибора;



$C = \frac{\Delta q}{q}$  — коэффициент старения,  $\frac{1}{\text{час}}$ ;

$\Delta q$  — изменение параметра схемного элемента за 1 час.

Поступая так же, как и при составлении уравнения относительной погрешности выходного параметра цепи, вызванной влиянием температуры, получим уравнение относительной погрешности выходного параметра в результате старения схемных элементов

$$\left[ \frac{\Delta N}{N} \right]_{\text{с т}} = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f(q_1, q_2, \dots, q_n)} \cdot C \right] \Delta \tau.$$

В этом уравнении сомножитель в квадратных скобках представляет собой коэффициент старения выходного параметра электронной цепи, определяемый как сумма произведений коэффициентов старения элементов, входящих в цепь, на их коэффициенты влияния. Учет старения схемных элементов радиоэлектронной аппаратуры сводится к определению коэффициента старения выходного параметра цепи и определению максимально возможной погрешности при выбранном интервале времени работы аппаратуры.

Формулы для определения численных характеристик коэффициента старения запишутся:

а) среднее значение коэффициента старения

$$M(C_{\Sigma}) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f(q_1, q_2, \dots, q_n)} \right] \times \\ \times [\Delta(C_i) + a_{C_i} \delta(C_i)];$$

б) половина поля допуска коэффициента старения

$$\delta(C_{\Sigma}) = \\ = \frac{1}{K_{\Sigma}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{f(q_1, q_2, \dots, q_n)} \right]^2 K_{C_i}^2 \delta^2(C_i)}.$$

Здесь  $C_i$  — коэффициент старения  $i$ -го параметра;  
 $\Delta(C_i)$  — координата середины поля допуска;  
 $a_{C_i}$  — коэффициент относительной асимметрии;  
 $\delta(C_i)$  — половина поля допуска коэффициента старения  
 $i$ -го параметра;  
 $K_{C_i}$  — коэффициент относительного рассеивания.

Определив среднее значение  $M(C_\Sigma)$  и половину поля допуска  $\delta(C_\Sigma)$  коэффициента старения выходного параметра, найдем величины предельных значений коэффициента старения из очевидного соотношения

$$C_{\Sigma \text{ пред}} = M(C_\Sigma) \pm \delta(C_\Sigma).$$

После расчета предельных значений коэффициента старения  $C_{\Sigma \text{ пред}}$  определяется величина допуска на старение выходного параметра цепи по формуле

$$\delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\text{ст}} = C_{\Sigma \text{ пред}} \Delta \tau.$$

Под допуском на старение понимается допуск, ограничивающий изменение параметров схемных элементов или выходных параметров аппаратуры за данный интервал времени в результате старения схемных элементов. Этим интервалом времени с некоторым приближением можно считать период эксплуатации аппаратуры с момента ее изготовления до первых регламентных работ или времени между регламентными работами.

Эксплуатационные допуски на выходные параметры электронной цепи, выбранные из условий надежности, должны представлять собой сумму трех допусков: производственного, температурного и допуска на старение, а суммирование должно проводиться по правилам случайных величин. Половина поля эксплуатационного допуска на выходной параметр электронной цепи, устанавливаемого техническими условиями (ТУ), записывается:

$$\begin{aligned} & \delta\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\Sigma} = \\ & = \sqrt{\delta^2\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\text{пр}} + \delta^2\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\text{т}} + \delta^2\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{\text{ст}}}. \end{aligned}$$

Из формулы видно, что в требованиях к аппаратуре при заданном допуске на выходной параметр цепи учет старения схемных элементов приводит к дальнейшему ужесточению допусков на их параметры, так как допуски на параметры схемных элементов должны выбираться такими, при которых предельные отклонения выходного параметра цепи будут меньше допуска, заданного по ТУ на величину, равную сумме температурного допуска и допуска на старение.

Поскольку допуск на старение ограничивает изменение выходных параметров аппаратуры в период эксплуатации, то в момент выпуска радиоаппаратуры с завода предельные отклонения выходных параметров должны быть меньше допусков, заданных ТУ, и не должны превышать суммы производственного и температурного допусков выходных параметров. Отсюда сумма производственного и температурного допусков на выходные параметры электронных цепей представляет собой допуск на приемку готовых изделий:

$$\delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{\text{вых}} = \sqrt{\delta^2 \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{\text{пр}} + \delta^2 \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{\text{т}}},$$

где  $\delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{\text{вых}}$  — половина поля допуска на выходной параметр электронной цепи готового радиоизделия.

Отношение эксплуатационного допуска выходного параметра цепи к допуску этого параметра при приемке готового изделия некоторые авторы называют коэффициентом надежности:

$$K_n = \frac{\delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{\text{экс}}}{\delta \left( \frac{\Delta N}{N} \right)_{\text{вых}}}.$$

Коэффициент надежности показывает, как велик «запас» эксплуатационного допуска на уход параметров в результате старения схемных элементов.

При выбранных типах схемных элементов цепи однозначно определяется допуск на старение и температурный допуск на выходные параметры цепи. Достижение нужной точности выходных параметров и обеспечение высокой эксплуатационной надежности сложной радио-

электронной аппаратуры связаны с определением доли суммарного допуска, являющейся производственным допуском выходного параметра, и получение ее путем варьирования величинами допусков на эти элементы. Поэтому решающим значением в выпуске надежных изделий является правильный выбор методов достижения нужной точности выходных параметров при настройке радиоэлектронной аппаратуры.

### **§ 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРИ НАСТРОЙКЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

При проектировании радиоэлектронной аппаратуры иногда ограничиваются предположением, что характеристики схемных элементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности) соответствуют номинальным значениям с учетом допусков, а параметры электронных ламп или транзисторов в данной рабочей точке равны расчетным значениям, определенным по усредненным характеристикам. Однако, как мы убедились в предыдущем параграфе, на практике параметры всех элементов схемы отличаются от расчетных номинальных значений (производственные погрешности, температурное воздействие, длительное хранение и т. п.) и, как следствие этого, значения выходных параметров, определяющих надежность функционирования схемы, получаются отличными от расчетных.

Настройка каждого типа сложной радиоэлектронной аппаратуры и ее отдельных блоков имеет свои особенности, вытекающие из особенностей построения схемы и конструкции и достаточно хорошо описанные в [10, 11]. Сущность настроечных работ сводится к тому, чтобы в результате компенсации неточности изготовления деталей и узлов и согласования их параметров аппарата давала необходимый эксплуатационный эффект при наименьших затратах. Уменьшения погрешности выходных параметров каждого каскада настраиваемого блока, т. е. увеличения точности его работы, а следовательно, и надежности работы аппаратуры в целом, следует добиваться по двум основным направлениям:

1) уменьшением величины ошибок, вносимых каждым участком электрической цепи. Это достигается путем поиска и изъятия из схемы элементов, характери-

ки которых вышли за поле допуска или даже только приблизились к ним;

2) уменьшением степени взаимного влияния каскадов.

Степень взаимного влияния элементов, каскадов и блоков может быть различной. Например, отклонение от номиналов сопротивлений утечки или емкостей переходных конденсаторов приводит к изменению параметров ламп, но настолько незначительному, что последствия этой связи с точки зрения точности и надежности работы схемы невелики. В то же время уход напряжения источников анодного питания и сеточного смещения, отклонение величин сопротивлений анодной и катодной нагрузки могут существенно изменить параметры лампы.

Особое внимание взаимозависимости параметров электрических цепей следует уделять при комплексной настройке сложных радиоэлектронных систем. Хотя отдельные блоки могут и удовлетворять своим техническим условиям, но точки их сопряжения и второстепенные характеристики оказываются не всегда проверенными, что приводит к нарушению надежного функционирования системы. Часто сложная радиоэлектронная аппаратура в целом имеет неудовлетворительные параметры и даже может отказать, в то время как ни один из входящих в нее блоков не отказывает, причем их параметры находятся в пределах норм технических условий.

Следует иметь в виду, что обычно пределы работоспособности и диапазон изменений выходных параметров отдельного блока должны быть всегда несколько шире, так как в противном случае при сопряжении с другими блоками работоспособность всей радиоэлектронной системы может оказаться ниже, чем работоспособность отдельного блока.

Очевидно, что при комплексной настройке мелкосерийной сложной радиоэлектронной аппаратуры может оказаться целесообразной настройка и проверка параметров при условии, что каждый блок будет не только самостоятельно настроен, но и проверен при работе в комплексе с другими блоками. Имеющаяся практика выпуска мелкосерийной аппаратуры показывает, что 50—60% регулировочных элементов, входящих в схемы отдельных блоков, используется только во время комплексной настройки аппаратуры. Необходимость такого

значительного числа комплексных регулировочных элементов отчасти объясняется неизбежным разбросом параметров межблочных кабелей, сменой ламп, транзисторов и отдельных функциональных узлов и субблоков, а иногда трудностью априорного сопряжения электрических допусков на выходные параметры совместно устанавливаемых блоков системы. Условия взаимодействия режимов при комплексной настройке дают возможность оценить воздействие совокупности дестабилизирующих факторов на аппаратуру, а также определить ее поведение при воздействии отдельных эксплуатационных факторов.

Решающее значение в обеспечении требуемой степени точности изготовления и эксплуатационной надежности сложной радиоаппаратуры имеет выбор метода настройки. Для достижения требуемой точности работы электронных цепей известны пять основных методов:

**Метод полной взаимозаменяемости**, который заключается в том, что требуемая точность выходных параметров электронных цепей у партии изделий, выпускаемых заводом, достигается путем включения в схему элементов с заданными на их параметры допусками без какого-либо дополнительного отбора или подгонки при настройке.

Практическим критерием обеспечения полной взаимозаменяемости при нормальном распределении отклонений принято считать соотношение между кривой распределения погрешностей выходного параметра устанавливаемого каскада и полем допуска на него, при котором допуск равен  $\pm 3\sigma$  и в пределах поля допуска содержится 99,73 %<sup>1</sup> всех изделий и лишь 0,27 %<sup>1</sup> изделий могут выходить за пределы поля допуска по параметру.

**Метод неполной частичной взаимозаменяемости.** Сущность метода неполной взаимозаменяемости заключается в том, что поле допуска уже, чем  $\pm 3\sigma$ . При этом заметный процент изделий в партии может не уложиться в допуск по параметру. Отличие этого метода от метода полной взаимозаменяемости заключается в том, что в этом случае могут быть взяты менее жесткие допуски на параметры ламп, транзисторов и схемных элементов.

**Метод групповой взаимозаменяемости**, который заключается в том, что требуемая точность выходных параметров электронной цепи достигается путем включения

в цепь одного или нескольких схемных элементов с узкими допусками на их параметры, полученными в результате отбора группы элементов из партии таких же элементов с более широкими допусками.

В процессе производства радиоэлектронной аппаратуры часто допуски на выходные параметры электронных цепей изделий должны быть намного меньше допусков на параметры ламп, полупроводниковых и схемных элементов. В таких случаях требуемая точность может быть достигнута методом групповой взаимозаменяемости.

**Метод подгонки**, который заключается в том, что требуемая точность выходных параметров электронной цепи достигается путем подбора одного из схемных элементов с постоянными параметрами и постановка его в схему обеспечивает частичную или полную компенсацию погрешностей выходных параметров.

Метод подгонки дает возможность получить высокую точность выходных параметров аппаратуры при использовании схемных элементов, ламп и транзисторов с большими допусками на параметры, вместе с тем, он требует специализированных стендов для настройки или настройщиков высокой квалификации для выполнения дополнительных работ, связанных с измерениями и подгонкой выходных параметров настраиваемой схемы [12].

**Метод регулировки**, который заключается в том, что требуемая точность выходных параметров достигается путем изменения величины параметра компенсирующего звена, в результате чего обеспечивается компенсация погрешностей выходных параметров. Принципиально метод регулировки аналогичен методу подгонки. Различие между ними заключается лишь в том, что при подгонке компенсация погрешностей осуществляется путем подбора и постановки в схему элемента с постоянными параметрами, а при регулировке компенсация обеспечивается регулировочными элементами, т. е. специальными схемными элементами с переменными параметрами.

Использование регулировочных элементов вместо элементов с постоянными параметрами расширяет возможности настройки, так как позволяет получать нужную точность выходных параметров схемы как в период производства, так и при эксплуатации.

Удобство этого метода заключается в обеспечении возможности поддержания необходимой эксплуатации.

онной точности и надежности аппаратуры при замене отказавших комплектующих элементов, узлов или блоков и при уходе их параметров от номинальных значений в результате старения.

Однако следует иметь в виду недостатки метода регулирования с точки зрения надежности:

- постановка в схему регулировочных элементов как правило снижает надежность аппаратуры, так как их надежность значительно ниже надежности элементов с постоянными параметрами ввиду наличия токосъемника, необходимости фиксации положения, трудности влагозащиты и т. д.;

- большое количество регулировок значительно усложняет технологический процесс сборки аппаратуры, усложняет ее эксплуатацию, повышает требования к квалификации обслуживающего персонала и дисциплине обслуживания.

Противоречивость свойств метода регулирования в обеспечении уровня эксплуатационной надежности выпускаемой сложной радиоэлектронной аппаратуры требует выбора оптимального количества вводимых в схему регулировочных элементов.

В настоящее время успешное решение задачи обеспечения эксплуатационной надежности сложных радиоэлектронных устройств многократного действия невозможно без проведения технологического прогона смонтированной и отрегулированной системы в условиях производства, максимально приближенных к реальным. Проиллюстрируем это на графике распределения отказов во времени (рис. 2.3) для сложных радиоэлектронных комплексов.

Наклон кривой (кривая *I*) на участке *АВ* характеризует уровень технической надежности изделия, заложенной при проектировании и обеспеченной в процессе производства. Обычно, чем круче наклон кривой на участке *АВ*, тем более надежно выполнена ее сборка, монтаж и настройка. В случае, когда спад на участке *АВ* идет более полого (кривая *II*), то период выявления различных отказов растягивается и полностью, или почти полностью, стирается граница перехода между периодами приработки и нормальной эксплуатации. Это обычно, свидетельствует о низкой культуре производства. При этом период нормальной работы аппаратуры



( $T_{II}$ ) уменьшается, период приработки ( $T_I$ ) фактически переходит непосредственно в период износа, а абсолютное число отказов для одних и тех же моментов эксплуатации аппаратуры разного качества возрастает.

Совершенно очевидно, что изделие не должно поступать в эксплуатацию до тех пор, пока в условиях производства интенсивность отказов не достигнет окрестности

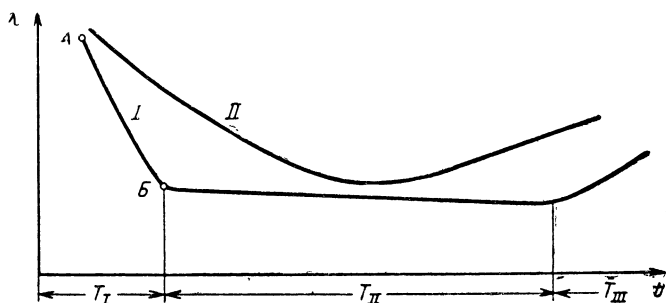


Рис. 2.3. Кривые изменения интенсивности отказов аппаратуры во времени:

$T_I$  — период приработки;  $T_{II}$  — период нормальной эксплуатации;  
 $T_{III}$  — период старения (износа).

точки Б. При этом большая часть дефектов конструкции, технологического процесса производства, а также комплектующих элементов должна выявиться во время производственных испытаний и технологического прогона. Если же аппаратура поступит к потребителю до окончания периода приработки  $T_I$ , то эксплуатационная надежность будет понижена за счет повышения начальной частоты отказов. Однако выпуск готовых изделий, наработка которых в условиях производства значительно превосходит необходимую длительность периода приработки, влечет за собой неоправданный расход технического ресурса и удорожание производства.

Поэтому необходимо определять и обосновывать оптимальную длительность периода приработки радиоэлектронной аппаратуры, а следовательно, и технологического прогона как аппаратуры в целом, так и ее частей. Основная цель прогона — максимальное уменьшение вероятности ранних отказов во время эксплуатации. В современной практике длительность прогона сложных

радиоэлектронных устройств колеблется в пределах 48—72 час. Эффективность технологического прогона радиоэлектронных систем многократного действия может быть повышена за счет периодических включений и выключений в течение прогона.

Для оценки эффективности технологического прогона и предполагаемой эксплуатационной надежности необходимо иметь соответствующие данные по результатам прогона, характеризующие наблюдаемые отказы и стабильность основных параметров изделия. Поэтому в технологический цикл изготовления следует включить систематизированный сбор данных по возникающим отказам в процессе заводских испытаний аппаратуры. Записи должны производиться в такой форме, чтобы их можно было использовать немедленно, без всякого редактирования. По возможности должно быть дано конкретное объяснение причин каждого отказа, например неисправность элемента, ненадежная заделка высокочастотных кабелей, наличие наводок, ошибки в монтаже, неправильный выбор деталей по устойчивости к дестабилизирующим факторам и т. д. Должны быть замерены и записаны величины, характеризующие воздействия, вызвавшие отказы.

Для понимания физической сущности возникающих отказов и правильного принятия необходимых мер по их устранению следует обращать внимание и фиксировать любые необычные явления, имеющие место во время прогона (например, недолговременные срывы АПЧ или изменения уровня шумов, «дрожание» электронных масштабных отметок, пробои в волноводном тракте, кратковременные искрения в магнетроне и т. п.).

Форма записи отказов может быть самой разнообразной [5]. С учетом сделанных замечаний результаты прогона и испытаний могут быть представлены в виде следующей таблицы:

Шифр и заводской № узла (системы)	Наработка узла (системы) до отказа, час	Место нахождения отказа (схемная позиция)	Условия, при которых произошел отказ	Причина и характер отказа	Последствия отказа	Число отказов за время прогона	Примечание

При анализе причин отказов, возникших во время настройки, производственных испытаний и при технологическом прогоне радиоэлектронных систем, следует руководствоваться следующими положениями:

— если параметры какого-либо элемента вышли за пределы установленного для него допуска, но это не привело к неисправности изделия в целом, то такой элемент не заменяется и отказ не фиксируется;

— если же параметры какого-либо элемента, блока или узла находятся в пределах допуска, однако имеет место неисправность аппаратуры в целом, то такой элемент заменяется и фиксируется отказ. В этом случае должны быть приняты меры по изменению схемы или конструкции аппаратуры;

— при ошибочном определении причины неисправности в процессе анализа, т. е. если параметры системы после замены компоненты по-прежнему не соответствуют ТУ, то в систему необходимо снова установить замененную компоненту (деталь, узел, блок);

— в случае, когда отказ наблюдается на время прогона, но самопроизвольно исчез в процессе отыскания его причины, он должен учитываться как отказ во время прогона;

— если в процессе анализа выясняется, что вышло из допуска сразу несколько элементов и неисправность любого из них не является следствием отказа другого элемента, то неисправность каждого из них должна классифицироваться как причина отказа системы во время прогона, и, наоборот, все зависимые отказы учитываются как один отказ системы.

Недостатки, выявленные во время настройки производственных испытаний и технологического прогона, можно классифицировать следующим образом;

— **недостатки механической конструкции** (неправильный выбор материала по механическим характеристикам, плохое закрепление отдельных деталей и узлов и т. д.);

— **недостатки электрической схемы** (наличие наводок, неправильный выбор схемы по режимам элементов и т. д.);

— **недостатки производства** (дефектная сборка, ошибки в монтаже, дефекты изготовления узлов и деталей, низкая технологическая культура и дисциплина и т. д.).

# КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА — КОНТРОЛЬ НАДЕЖНОСТИ

### § 1. ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ

Чем сложнее и многофункциональнее изготавливаемая радиоаппаратура, тем шире номенклатура и больше количество применяемых в ней деталей и материалов. Увеличение количества комплектующих радиодеталей и элементов, если не принять соответствующих мер, приводит к снижению эксплуатационной надежности радиоаппаратуры, так как в большинстве случаев отказы аппаратуры происходят за счет отказов одного или ряда входящих в нее элементов. Значит, решение задачи обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры должно начинаться с обеспечения безотказной работы ее элементов.

Изменчивость — свойство, присущее природе и, следовательно, оно также присуще и всякой производимой продукции. Двух совершенно одинаковых предметов не существует, хотя разница между ними может быть настолько небольшой, что ее не обнаружишь невооруженным глазом. Для того чтобы можно было установить степень изменения свойств того или иного радиоэлемента (резистора, конденсатора, радиолампы и др.), изготовители или потребители устанавливают некоторые нормы, при соблюдении которых качество изготовления считается удовлетворительным. Эти нормы (стандарты), как уже отмечалось выше, определяют обычно не только желаемые свойства элемента, но и верхний, и нижний

пределы их возможного изменения, при котором качество того или иного элемента все еще можно считать удовлетворительным. Такие верхние и нижние пределы называют допусками или установленными пределами.

При контроле качества продукции заводом-изготовителем всегда стоят две проблемы. Во-первых, он должен так организовать контроль процесса производства, чтобы исключить возможность выпуска дефектной продукции. Во-вторых, он должен исключить возможность выпуска с завода таких партий продукции, которые содержали бы высокий процент невыявленных дефектных элементов, могущих явиться причиной отказов в дальнейшем. В связи с этим, говоря о контроле, следует рассматривать две стороны этой задачи: контроль в процессе производства и контроль изготовленной продукции.

С первого взгляда может показаться, что если контроль производственного процесса организован правильно, то нет никаких оснований беспокоиться о качестве изготавливаемой продукции. В некоторой степени это утверждение правильно. Действительно, чем лучше налажен контроль производственного процесса, тем выше надежность выпускаемой продукции и тем меньше приходится затрачивать средств на организацию контроля изготовленных изделий. Однако, как мы увидим дальше, контроль качества уже изготовленной продукции также необходим для обеспечения высокого уровня надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры при серийном производстве.

В настоящее время на сборочных заводах контроль процесса производства любого радиоприбора в большинстве случаев начинается с входного контроля поступающих на завод радиодеталей и элементов. Иначе говоря, поступающие на завод радиодетали и элементы, прежде чем их отправить в сборочные цехи, проходят проверку на соответствие требованиям своих ТУ по товарному виду и основным электрическим параметрам. Входной контроль комплектующих элементов на заводе-потребителе — это своеобразный передний край борьбы за обеспечение высокого уровня эксплуатационной надежности выпускаемой заводом радиоэлектронной аппаратуры.

Действительно, на многих радиозаводах стоимость всех трудовых затрат, начиная от изготовления отдель-

ных блоков и узлов аппаратуры и кончая их сборкой и монтажом, составляет примерно одну десятую часть стоимости комплектующих изделий, поступающих в основном с заводов-поставщиков [13]. Вместе с тем, качество изготовления большинства комплектующих элементов, и в особенности полупроводников, не всегда соответствует требованиям, предъявляемым к эксплуатационной надежности современной радиопаратуры. Поэтому заводы, получающие полупроводники, радиолампы, резисторы, конденсаторы, и т. п. вынуждены осуществлять входной контроль. Это дает возможность повысить надежность выпускаемой аппаратуры, но при этом существенно возрастает и ее стоимость.

Поступающие на заводы-потребители партии комплектующих радиодеталей и элементов с недостаточной эксплуатационной надежностью можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся элементы, изготовленные с нарушением технологии производства и с недостаточным контролем на выходе, ко второй — с продолжительным хранением готовых изделий на складах, результатом которого является старение деталей и материалов и ухудшение качественных показателей. И то, и другое при постановке таких радиодеталей в аппаратуру приводит к снижению надежности ее работы.

Дефектные элементы и детали первой группы являются, как правило, причиной внезапных отказов, которые выявляются на начальном этапе работы аппаратуры. Внезапный отказ радиолампы, полупроводника или сопротивления и т. п. стимулируется переходными процессами, имеющими место при работе аппаратуры. Например, при нарушении внутреннего контакта у вывода полупроводника бросок тока при включении, в конечном итоге, ведет к выходу его из строя и прекращению выполнения аппаратурой или ее частью своего назначения.

Вторая группа отмеченных нами деталей и элементов вызывает, как правило, так называемые постепенные отказы (параметрические), которые начинают появляться в аппаратуре намного раньше, чем если бы это было для элементов с неиспользованным сроком хранения.

Возникновение параметрического отказа связано с постепенным изменением (дрейфом) одного или не-

скольких основных параметров элемента, в результате чего этот параметр выходит за пределы, обеспечивающие сохранение установленных качественных показателей на устройство в целом. Так, например, вследствие длительного хранения понижается эмиссия электронной лампы, изменяется емкость конденсатора или величина резистора, поэтому в случае их использования аппаратура сравнительно быстро перестает нормально выполнять все или часть своих основных функций, а частота отказов резко возрастет.

Указанные причины недостаточной надежности комплектующих элементов и должны определять подход на входном контроле производства радиоаппаратуры к оценке требований их технических условий. Точная формулировка требований, предъявляемых к каждому разрабатываемому и изготавливаемому элементу — одна из важнейших предпосылок повышения надежности выпускаемой радиоэлектронной аппаратуры. Жесткий, хорошо организованный контроль качества комплектующих радиодеталей и элементов может существенно повысить уровень надежности и экономичность изготавливаемой аппаратуры. Такой контроль можно осуществлять на заводе-изготовителе (выходной контроль), либо на заводе-потребителе (входной контроль).

В настоящее время большинство заводов, занятых производством сложной радиоэлектронной аппаратуры, контролирует получаемые комплектующие элементы и детали, хотя последние проходят проверку на соответствие требованиям ТУ на своих заводах-изготовителях. На заводах-потребителях при отсутствии специального автоматизированного контрольного оборудования входной контроль приводит к увеличению производственного цикла изготовления и дополнительным затратам [13].

В этом нетрудно убедиться. Поступающие на завод-потребитель комплектующие радиодетали и элементы от заводов-поставщиков могут дополнительно не проверяться, проходить 100%-ный входной контроль или подвергаться выборочной проверке. Если поступающие на завод-потребитель комплектующие элементы не контролируются, то полная стоимость работ по устранению всех бракованных элементов будет равна

$$C_1 = pNA, \quad (1)$$

где  $p$  — доля брака в поставленной партии рассматриваемых комплектующих элементов;

$N$  — количество элементов в партии;

$A$  — затраты на отыскание одного неисправного элемента в аппаратуре и замену его годным.

При 100%-ном входном контроле полная стоимость работ по устранению всех бракованных элементов будет состоять из затрат на контроль поступивших элементов и затрат на замену забракованных элементов в собранной аппаратуре:

$$C_1 = NB + k_1 p N A, \quad (2)$$

где  $B$  — стоимость входного контроля одного элемента;

$k_1$  — коэффициент, учитывающий долю брака, пропущенного при 100%-ном входном контроле.

В случае выборочного контроля качества элементов, полная стоимость складывается из двух частей.

Первая часть — стоимость приемки той партии элементов, качество которой было определено в процессе выборочной проверки:

$$C'_1 = P [(N - n) p A + n k_2 p A + n B],$$

где  $n$  — число выбранных элементов;

$nB$  — стоимость входного контроля выбранных элементов;

$(N - n) p A$  — стоимость замены бракованных элементов, которые находились в непроверяемой части партии;

$n k_2 p A$  — стоимость замены бракованных элементов, которые находились в проверяемой части партии (выборке) и были пропущены контролером;

$P$  — вероятность того, что партия элементов будет принята.

Вторая часть — стоимость отбракованных элементов при выборочном контроле партии и возвращенных заводу-поставщику равняется стоимости контроля отобранных элементов, умноженной на вероятность отбраковки  $1 - P$ . Полная стоимость отбракованных партий будет примерно равна

$$C''_1 \approx \frac{nB(1 - P)}{p}.$$



Таким образом, полная стоимость при вторичном контроле определяется выражением

$$C_3 = C'_3 + C''_3 = P [nB + (N - n) pA + nk_2 pA] + \frac{nB(1 - P)}{p}. \quad (3)$$

Из анализа выражений (1) — (3) следует, что в каждом из рассмотренных случаев подхода к контролю качества поступающих на завод-потребитель комплектующих элементов недостаточный уровень их надежности влечет за собой удорожание радиоэлектронной аппаратуры. Выбор оптимального метода контроля зависит от размеров партий комплектующих деталей и элементов и доли содержащегося в ней брака  $p$ , а также от параметров  $A$  и  $B$ , которые определяются статистическим путем в процессе каждого конкретного производства.

Суммируя затраты всех предприятий на входной контроль радиодеталей и элементов, а также стоимость оборудования для осуществления эффективного входного контроля, нетрудно убедиться в том, что проверять радиоэлементы целесообразно все-таки не на каждом заводе-потребителе, а только на заводах, где эти элементы изготавливаются. Введение всестороннего полного контроля на заводе-поставщике вызовет определенные затраты, но они быстро окупятся: при централизованной проверке комплектующих элементов стоимость контроля значительно уменьшится, а его качество возрастет. Это приведет к изготовлению более надежной радиоаппаратуры.

По сообщению зарубежной печати, американская фирма «Юз Эйкрафт Компани» добилась того, что поставщики проводят всесторонний контроль параметров и испытания поставляемых элементов, представляя вместе с партиями комплектующих элементов специальные документы, подтверждающие проведение соответствующих испытаний. После двух лет такого выходного контроля элементов количество отказов в выпускаемой фирмой сложной радиоэлектронной аппаратуре резко уменьшилось. Например, по потенциометрам с 32 до 1,5%, по конденсаторам разных типов с 23 до 1,7%.

Надежность комплектующих радиодеталей и элементов нужно и можно увеличить, проводя целенаправ-

ленные испытания на заводах-поставщиках. Заводу, изготавливающему радиоэлементы, легче судить о качестве выпускаемых им изделий и оперативно вмешиваться в производственный процесс для предотвращения брака, а также эффективно и экономично совершенствовать методы контроля. Тогда для многих заводов, занимающихся производством радиоаппаратуры, отпадает необходимость в приобретении дорогостоящей измерительной и технологической аппаратуры. Такое совершенствование методов контроля радиоэлементов повышает их эксплуатационную надежность и дает возможность в целом получать большую экономию средств.

## **§ 2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ**

Надежность радиоэлектронной аппаратуры непосредственно зависит от условий и среды, в которых работает аппаратура и ее элементы. Аппаратура, работающая достаточно надежно в одних условиях, может оказаться ненадежной в других. Чем выше нормы допустимых воздействий окружающих условий, при которых сохраняются качественные показатели аппаратуры, тем выше, при прочих равных условиях, ее надежность в реальных условиях эксплуатации. Поэтому для поддержания высокого уровня надежности изготавливаемой аппаратуры очень большое значение имеют периодические испытания. Во время периодических испытаний контролируются качественные показатели, которые по тем или иным причинам не проверяются при приемосдаточных испытаниях. При этом важную роль играют испытания на устойчивость качественных показателей аппаратуры при воздействии внешних факторов в пределах норм, оговоренных в ТУ или стандартах. Испытательные нормы воздействующей среды выбираются в соответствии с ожидаемыми условиями эксплуатации и обычно устанавливаются в ТУ и стандартах с некоторым запасом.

В настоящее время радиоэлектронная аппаратура находит широкое применение в различных областях техники и народного хозяйства: радиолокации, радиосвязи, радионавигации, радиоастрономии, телевидении, радиовещании, медицине, промышленной автоматике

и т. д. В зависимости от конкретных условий эксплуатации, радиоаппаратура подвергается различным видам воздействий температуры, вибрации, акустического шума, ударам, нестабильности напряжения источников питания, влажности, давления, пыли и других факторов, влияющих в реальных условиях эксплуатации на надежность работы раздельно и комплексно.

Основным требованием, предъявляемым к аппаратуре при воздействии на нее метеорологических факторов и механических нагрузок в условиях эксплуатации и испытаний, должно быть требование сохранности технических и эксплуатационных характеристик в пределах норм, установленных частными техническими условиями на аппаратуру или стандартами. При серийном производстве выполнение этого требования должно контролироваться путем периодического проведения климатических и механических испытаний выпускаемой продукции, причем размеры выборки и частота испытаний должны обеспечивать достоверность контроля продукции установившегося производства на уровне не ниже 0,7.

Приведем рекомендуемые нормы внешних воздействий, которые следует оговаривать в ТУ и по которым должна проверяться устойчивость различных групп аппаратуры в зависимости от вероятных условий эксплуатации, транспортировки и хранения. Рекомендуемые ниже нормы отражают многолетний опыт производства и эксплуатации высококачественной отечественной радиоаппаратуры [14].

### **Климатические воздействия в зависимости от условий эксплуатации и хранения**

1. Комнатная аппаратура, предназначенная для работы в закрытых стационарных помещениях (например, радиовещательная, промышленной радиоэлектроники и др.).

Окружающая среда характеризуется нормальными условиями:

- температура  $+20 \pm 5^\circ \text{C}$ ;
- относительная влажность  $65 \pm 15\%$ ;
- атмосферное давление  $750 \pm 30$  мм рт. ст.

Во время транспортировки и хранения в нерабочем состоянии аппаратура в упаковочной таре может находиться в предельных климатических условиях:

- относительная влажность 95—98% (при температуре  $+40^\circ \text{C}$ );
- отрицательная предельная температура  $-50^\circ \text{C}$ ;
- положительная предельная температура  $+50^\circ \text{C}$ ;

2. Аппаратура, предназначенная для работы в неотопляемых помещениях в условиях СССР (в том числе в кузовах автомашин, временных укрытиях, палатках и т. п.).

Окружающая среда характеризуется условиями:

- относительная влажность до 95—98% (при температуре +40° С);

- отрицательная рабочая температура —10° С (предельная —50° С);

- положительная рабочая температура +50° С (предельная +65° С);

- дождь (интенсивность водяных брызг) — 5 мм/мин.

Суточные колебания температуры могут создать конденсацию влаги. Биологическая среда характеризуется воздействием плесневых грибов, а также грызунов.

3. Наземная аппаратура, предназначенная для работы на открытом воздухе в условиях СССР (например, геологическая, сельского хозяйства, лесной промышленности и др.).

Окружающая среда характеризуется условиями:

- относительная влажность до 98% (при температуре +40° С);

- отрицательная рабочая температура —50° С;

- положительная рабочая температура +55° С (предельная +70° С);

- дождь (интенсивность водяных брызг) — 5 мм/мин;

- погружение в воду — 50 мм;

- скорость воздушного потока пыли 10—15 м/сек.

Биологическая среда характеризуется воздействием плесневых грибов, грызунов, длительным воздействием соляного тумана и солнечной радиации.

4. Аппаратура, предназначенная для работы на судах.

Окружающая среда характеризуется условиями:

- относительная влажность до 98% (при температуре +40° С);

- отрицательная рабочая температура —10° С (предельная —40° С);

- положительная рабочая температура +50° С (предельная +65° С);

- аппаратура, предназначенная для работы на верхних палубах и мачтах подвержена воздействию воды, соляного тумана и солнечной радиации. Воздействия дождя и биологической среды аналогично приведенным для наземной аппаратуры, работающей на открытом воздухе.

5. Аппаратура, устанавливаемая на быстроходных катерах, тракторах, вертолетах, промышленных механизмах с высоким уровнем вибрации.

Окружающая среда характеризуется условиями:

- относительная влажность 95—98% (при температуре +40° С);

- отрицательная рабочая температура —40° С (предельная —50° С);

- положительная рабочая температура +50° С (предельная +65° С);

- дождь (интенсивность водяных брызг) — 5 мм/мин;

- погружение в воду — 5 мм;

- скорость воздушного потока пыли 10—15 м/сек.

Биологическая среда характеризуется воздействием плесневых грибов.

6. Аппаратура, предназначенная для работы в тропических условиях.

Окружающая среда характеризуется условиями:

- относительная влажность 98% (при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$ );
- положительная рабочая температура  $+70^{\circ}\text{C}$  (предельная  $+80^{\circ}\text{C}$ );
- скорость воздушного потока пыли 10—15 м/сек.

Биологическая среда характеризуется длительным воздействием грибковой плесени, соляного тумана и солнечной радиации на изделия, установленные снаружи помещения (антенны, фидеры и др.).

7. Аппаратура, предназначенная для работы в арктических условиях.

Окружающая среда характеризуется воздействием высокой относительной влажности до 98%, а также воздействием соляного тумана при эксплуатации в прибрежных районах. Аппаратура метеослужбы, не обслуживаемая персоналом, длительно работает в условиях низких температур до  $-60^{\circ}\text{C}$  в Арктике и  $-80^{\circ}\text{C}$  в условиях антарктического климата.

8. Аппаратура, предназначенная для работы на самолетах гражданского воздушного флота.

Окружающая среда характеризуется условиями:

- относительная влажность до 98%;
- атмосферное давление на высоте 9 км 225 мм рт. ст.;
- отрицательная температура  $-55^{\circ}\text{C}$ ;
- положительная температура  $+55^{\circ}\text{C}$ .

Из-за резких изменений температуры в аппаратуре, размещенной вне герметических кабин, возможна конденсация влаги.

9. Аппаратура, предназначенная для метеорологических исследований (например, метеорологические ракеты, радиозонды и др.).

Окружающая среда характеризуется резким изменением значений температурного градиента воздуха, резким перепадом давления, воздействием космического излучения, метеорной пыли и ядерной бомбардировки.

## **Механические воздействия в зависимости от транспортировки и условий эксплуатации**

1. При транспортировке.

По железной дороге:

- частота вибрации 2—3 гц, максимальная амплитуда 38 мм;
- при маневрировании толчки (удары) с ускорением 40 g и длительностью импульса 20 мсек.

По шоссе:

- частота вибрации 0—80 гц;
- максимальная амплитуда 2,5 мм;

По воздуху:

- частота вибрации 10—150 гц;
- максимальная амплитуда 0,25 мм.

По морю:

- частота вибрации 1—15 гц;
- максимальная амплитуда 1,6 мм.

2. При эксплуатации.

Аппаратура, предназначенная для работы в кузовах автомашин

- частота вибрации 0—80 гц;

- амплитуда 0,1—2,5 мм;
- ускорение при ударах до 10 g.

Аппаратура переносная, рассчитанная на ее индивидуальную переноску людьми и транспортировку всеми видами транспорта:

- частота вибрации 10—120 гц;
- амплитуда 0,15—25 мм;
- ускорение при ударах 10—20 g.

Аппаратура, предназначенная для работы на судах:

- частота вибрации 0—25 гц;
- максимальная амплитуда 25 мм.

Аппаратура, устанавливаемая на быстроходных речных судах, тракторах, врубных машинах:

- частота вибрации 10—300 гц;
- максимальная амплитуда 1 мм;
- ускорение при ударах 15 g.

Аппаратура, предназначенная для работы на транспортных самолетах гражданского воздушного флота:

- частота вибрации 10—500 гц;
- максимальная амплитуда 0,75 мм;
- ускорение при ударах 5 g.

Узлы аппаратуры и ее отдельные блоки должны подвергаться механическим и климатическим испытаниям в полностью законченном виде в соответствии с ТУ.

Состояние аппаратуры (или узла) во время испытаний (под напряжением, без напряжения) должно оговариваться в технических условиях. Рекомендуется аппаратуру и узлы подвергать климатическим испытаниям после проведения электрических измерений (примосдаточных испытаний) и механических испытаний [15].

Механические испытания, в зависимости от характера воздействия на аппаратуру внешних факторов, подразделяются на следующие виды:

- испытание на вибропрочность;
- испытание на виброустойчивость;
- испытание на ударную прочность;
- испытание на устойчивость к воздействию центробежного ускорения;
- испытание на прочность при падении;
- испытание на взрывное воздействие;
- испытание на транспортирование.

При механических испытаниях узлы в соответствии с чертежами крепятся на специальных приспособлениях, имитирующих их закрепление в реальной аппаратуре; при необходимости конструкция приспособлений должна указываться в методике испытаний технических

условий. Приспособления закрепляются к столам испытательных стендов жестко, без амортизации.

Изделия (блоки, узлы) устанавливаются на стендах в трех взаимно перпендикулярных положениях (за исключением испытания на копре, когда изделия устанавливаются в одном положении). Уменьшение числа положений узла при испытаниях должно оговариваться в технических условиях.

При использовании ударных стендов рекомендуется для уничтожения возникающих при ударах колебаний высоких частот применять резиновые амортизирующие прокладки, устанавливаемые между соударяющимися элементами ударного стенда.

Величина испытательных параметров, как правило, измеряется на платформах стендов со следующей точностью:

- а) по амплитуде вибрации не менее  $\pm 20\%$ ;
- б) по частоте вибрации  $\pm 2$  гц на частотах до 70 гц и  $\pm 5$  гц на частотах свыше 70 гц;
- в) по ударному ускорению  $\pm 20\%$ .

Перечень параметров, подлежащих проверке при механических испытаниях, указывается в технических условиях.

Перед проведением каждого вида механических испытаний необходимо убедиться путем внешнего осмотра в отсутствии повреждений в деталях конструкции и в монтаже. Затем проверяются параметры аппаратуры, оговоренные в ТУ для данного вида испытаний. После этого проводится испытание, в течение (после) которого контролируются указанные в ТУ параметры.

Изделие считается выдержавшим испытание, если во время (после) испытания оно соответствует требованиям ТУ по данному виду испытания. Рассмотрим кратко основные виды испытаний на механическую прочность.

**Испытание на вибропрочность.** Это испытание подразделяется на испытание на одной частоте и испытание в диапазоне частот. Испытания на одной частоте проводятся с целью выявления дефектов сборки и монтажа, допущенных в процессе производства аппаратуры. Испытание в диапазоне частот проводится с целью проверки свойств аппаратуры сохранять свою прочность в условиях эксплуатационной вибрации. Аппаратура считается

выдержавшей испытание на вибропрочность, если после проведения испытания не обнаружено механических повреждений в конструкции и выходные параметры находятся в нормах ТУ.

Значения амплитуды на резонансных частотах, возникающих на отдельных узлах и деталях, определяются при помощи вибрографа, например ВР-1, микроскопа «Бринеля», приборов с электромагнитными или пьезоэлектрическими датчиками и другими приспособлениями (стробоскопический измерительный треугольник) и приборами, например аксельрометрами.

На этапе отработки конструкции выявляются частные резонансы в отдельных частях конструкции с целью их устранения, а также общей оценки вибропрочности аппаратуры.

**Испытание на виброустойчивость.** Эти испытания проводятся при включенном состоянии аппаратуры (под током) по нормам испытательных режимов в соответствии с требованиями ТУ. Аппаратура закрепляется на столе вибростенда в эксплуатационном положении. Амортизированная аппаратура испытывается на виброустойчивость на амортизаторах. Испытания проводятся при плавном изменении частоты в пределах каждого поддиапазона частот. Допускаются выдержки по времени на отдельных частотах поддиапазона.

В процессе испытания проверяется соответствие параметров блока (или узла) требованиям ТУ по данному виду испытания. При испытаниях блоков обращается внимание на правильность работы блока при возможных изменениях напряжения питания, а также на возникновение резонансных колебаний блока или его отдельных элементов. При обнаружении указанных резонансных колебаний следует принять меры к их устранению.

Проверка работы аппаратуры в условиях воздействия вибрации должна проводиться путем наблюдения за показаниями измерительных приборов и индикаторов, имеющихся в аппаратуре или подключенных к ней, и другими способами, оговоренными в методике ТУ, например прослушивание качества передачи речи в связных радиостанциях, радиоприемниках и др.

**Испытание на ударную прочность.** Аппаратура испытывается в нерабочем (выключенном) состоянии. Амортизированная аппаратура испытывается на своих амортизаторах.



тизаторах. Аппаратура стационарного размещения и транспортируемая на автомашинах и железнодорожных платформах испытывается в табельной упаковке. Переносная аппаратура испытывается в трех взаимно перпендикулярных положениях. Продолжительность испытания в эксплуатационном положении должна составлять 50% от общего времени испытания, указанного в ТУ, а в двух других положениях — по 25%.

Поблочные (по частям) испытания амортизируемой аппаратуры на воздействие ударных нагрузок рекомендуется производить на амортизаторах, подобранных для соответствующего веса таким образом, чтобы они давали тот же статический прогиб, что и реальная амортизированная аппаратура. Поблочные испытания неамортизированной аппаратуры проводятся по нормам требований, задаваемых в ТУ на аппаратуру.

Стационарная и транспортируемая аппаратура на автомашинах и железнодорожных платформах в табельной упаковке должна подвергаться испытаниям по нормам:

Вес аппаратуры, кг	Ускорение, g	Длительность импульса, msec
До 50	75	1,5—4,0
50—75	50	2,0—6,0
75—125	25	3,0—8,0
Более 125	20	4,0—10,0

При этом аппаратура может испытываться как с лампами, так и без ламп в зависимости от способа транспортировки ламп (раздельно или в аппаратуре). По окончании испытаний производится внешний осмотр аппаратуры и ее упаковки с целью выявления механических повреждений и ослабления креплений. После этого аппаратура включается и производится проверка ее параметров, предусмотренных ТУ для данного вида испытания.

**Испытание на транспортирование.** Этот вид испытания производится на вибрационных и ударных стендах по методике испытаний на вибропрочность и ударную прочность всей радиоэлектронной аппаратуры, подвер-

гающей перевозкам по железным дорогам и на автомобильном транспорте.

Если вес, габариты и конструкция аппаратуры не позволяют проводить испытания на стендах, то испытание осуществляют непосредственно на автомашинах (или железнодорожных платформах). Испытание на автомашинах производится по булыжным и грунтовым дорогам со скоростью 20—30 км/час на расстояние не менее 300 км. Транспортируемая аппаратура в тарных ящиках перевозится в упакованном виде; аппаратура, смонтированная в автомашине, может находиться при испытаниях во включенном состоянии.

Во время испытаний смонтированной аппаратуры производится наблюдение за состоянием аппаратуры, обращается внимание на состояние амортизационных креплений и т. п. По окончании испытаний аппаратура подвергается тщательному внешнему осмотру с целью выявления механических повреждений и удовлетворения требованиям программы испытаний ТУ по данному виду испытаний.

**Испытание на устойчивость к воздействию центробежного ускорения.** Изделие устанавливается на центрифуге. Положение и способы крепления оговариваются в частных ТУ или программе испытаний. Изделие должно подвергаться испытанию во включенном состоянии. Величина центробежных ускорений должна выдерживаться приблизительно в центре тяжести конструкции изделия (блока). Число оборотов платформы центрифуги для заданного ускорения  $J_{ц}$  и выбранного  $R$  подсчитывается по формуле:

$$n = \sqrt{\frac{J_{ц}}{11,2 \cdot 10^{-6} \cdot R}},$$

где  $n$  — число оборотов платформы, об/мин;

$J_{ц}$  — заданная величина ускорения, ед. силы тяжести;

$R$  — расстояние от центра вращения платформы до центра тяжести блока, см.

Расстояние от центра вращения платформы до центра тяжести груза противовеса  $r$  определяется по формуле

$$r = \frac{PR}{Q},$$

где  $P$  — вес испытываемого блока, кг;

$Q$  — вес груза противовеса, кг.

Изделие считается выдержавшим испытание, если не отмечается самопроизвольных срабатываний коммутрующих элементов, отсутствуют механические повреждения в конструкции и отклонения характеристик, измеренных до испытаний и после, соответствуют нормам, установленным ТУ.

**Испытание на прочность при падении.** В случае необходимости аппаратура подвергается десятикратным ударам при свободном падении на войлочную прокладку толщиной 15 мм, положенную на стальную плиту, с высоты 750 мм для аппаратуры весом до 10 кг и с высоты 500 мм для аппаратуры весом более 10 кг. Сбрасывание аппаратуры производится в том виде, в каком она переносится так, чтобы число ударов, приходящихся на грани, было равно 5, на ребра — 3 и на углы — 2.

Аппаратура считается выдержавшей испытания на прочность при падении, если она после испытаний соответствует требованиям ТУ.

После успешного завершения испытаний на механическую прочность, аппаратуру подвергают климатическим испытаниям. Климатические испытания в зависимости от характера воздействия на аппаратуру окружающей среды подразделяются на следующие виды:

- испытание на влагуостойчивость при кратковременном воздействии;
- испытание на холодоустойчивость;
- испытание на теплоустойчивость;
- испытание на брызгозащищенность;
- испытание на высотность;
- испытание в условиях инея и росы;
- испытание на водозащищенность;
- испытание на герметичность;
- испытание на пылезащищенность;
- испытание на влагуостойчивость при длительном воздействии;
- испытание на действие солнечной радиации;
- испытание в условиях соляного тумана;
- испытание на грибоустойчивость.

Перечень и методика измерений радиотехнических (электрических) параметров, подлежащих проверке при климатических испытаниях, указываются в ТУ на аппа-

ратуру и узлы. Если объем испытательной камеры не достаточен для испытания аппаратуры в полном комплекте, последняя может испытываться поблочно. Рассмотрим кратко основные виды климатических испытаний.

**Испытания на влагоустойчивость** (при кратковременном и длительном воздействиях) производятся с целью определения устойчивости параметров аппаратуры и выявления различных дефектов (например, коррозия, повреждение покрытий и др.) в условиях пребывания в среде с повышенной влажностью. Кратковременные испытания производятся с целью ускоренного выявления дефектов, которые могут возникнуть в процессе производства аппаратуры.

Аппаратура размещается в камере влажности, производится монтаж соединительных проводов аппаратуры с измерительными приборами для определения необходимых по частным ТУ параметров.

В камере устанавливается температура и относительная влажность в соответствии с требованиями ТУ. Допускается незначительное появление росы в виде отпотевания и разрозненных капель воды на аппаратуре. При кратковременных испытаниях через каждые 12—24 часа рекомендуется (без изъятия из камеры) измерять параметры аппаратуры, подлежащие проверке по данному виду испытаний. При длительных испытаниях параметры измеряются через каждые 2—5 суток. После окончания испытания аппаратура извлекается из камеры, выдерживается в нормальных условиях не менее 1 час, затем измеряются необходимые параметры и производится внешний осмотр.

**Испытание на холодоустойчивость** производится с целью определения устойчивости параметров аппаратуры и выявления различных дефектов (деформации деталей, нарушения герметичности, нарушения работы механизмов и органов управления и т. п.) в условиях низких температур. Режимы испытаний устанавливаются в технических условиях.

Аппаратура размещается в камере холода. В нормальных условиях измеряются необходимые параметры. Затем аппаратура выключается, в камере устанавливается отрицательная рабочая температура, при которой аппаратура выдерживается в течение времени, ука-

занного в ТУ. После этого измеряются необходимые параметры согласно требованиям ТУ. Далее температура в камере понижается до предельной величины, указанной в ТУ, и аппаратура выдерживается в течение 2 час. По истечении указанного срока температура в камере повышается до нормальной со скоростью 1—2 град/мин, и аппаратура выдерживается в течение 2—4 час, после этого измеряются необходимые параметры и производится осмотр.

**Испытание на теплоустойчивость** проводится с целью проверки работоспособности аппаратуры при повышенной температуре окружающей среды. В нормальных условиях перед испытанием и в процессе проведения испытания контролируются необходимые параметры согласно ТУ. После испытания в рабочих условиях аппаратура выдерживается в камере в нерабочем состоянии в предельных условиях в течение 2 час, затем после 4—6-часовой выдержки в нормальных условиях измеряются необходимые параметры и производится внешний осмотр. При осмотре проверяются: изменение цвета, вид защитных покрытий, состояние сопрягаемых деталей и др. Если после испытаний на теплоустойчивость аппаратура полностью удовлетворяет требованиям технических условий, то она считается годной.

**Испытание на брызгозащищенность** проводится с целью выявления безотказной работы аппаратуры во время или после пребывания ее в брызгозащищенной среде. Аппаратура подвергается во включенном состоянии в течение 2 час равномерному поочередному обрызгиванию с четырех боковых сторон водой под углом 45° с интенсивностью 5 мм/мин. Если дождь падает вертикально, допускается устанавливать аппаратуру, не имеющую жалюзи, на стол камеры под углом 45° к вертикальной оси. Во время испытания производится контроль работоспособности аппаратуры. Этим испытаниям должна подвергаться аппаратура, эксплуатирующаяся (или хранящаяся) на открытом воздухе или во временных укрытиях.

**Испытание на грибковую плесень (грибоустойчивость)** проводится с целью определения надежности работы аппаратуры в среде, зараженной плесневыми грибами и с высокой степенью влажности, а также с целью проверки устойчивости покрытий и материалов в этой

среде. Аппаратура считается выдержавшей испытания, если:

а) она сохранила способность выполнять свои функции в процессе и после испытаний в нормах, оговоренных техническими условиями;

б) степень биологического обрастания материалов, проводов и защитных покрытий, применяемых в этой аппаратуре, оценивается не выше двух баллов. Степень качества биологического обрастания производится по пятибалльной системе, рекомендованной МЭК (международной электротехнической комиссией);

в) отсутствуют общая и местная коррозия металлов и гальванических покрытий, примененных в этой аппаратуре.

По окончании испытания аппаратура должна быть дезинфицирована или уничтожена. Дезинфекция проводится путем обрызгивания аппаратуры и ее элементов формалином или 20-минутным облучением ртутно-кварцевой лампой.

**Испытание на действие солнечной радиации** проводится с целью определения стойкости покрытий и свойств электроизоляционных материалов за счет атмосферного старения. Испытание проводится облучением аппаратуры источниками света, по спектральному составу и интенсивности близкими к солнечному свету, в специальной камере, в которой проводится испытание. Перед испытанием производится сравнение внешнего вида аппаратуры с эталонным образцом и измерение параметров, указанных в программе испытаний или ТУ. В качестве эталонного образца берется изделие из числа идущих на испытание. Эталонный образец сохраняется в нормальных климатических условиях в течение всего времени испытаний. Аппаратура или ее отдельные элементы располагаются в камере таким образом, чтобы воздействие солнечной радиации было наиболее эффективным и в то же время соответствовало возможному воздействию в условиях эксплуатации.

Включаются источники солнечной радиации, после чего температура в камере доводится до  $+60 \pm 3^\circ \text{C}$ . Интегральная интенсивность излучения (ультрафиолетовая, инфракрасная, видимая часть) на поверхности испытуемых изделий должна соответствовать значениям  $1,4\text{—}1,8 \text{ кал/см}^2\text{мин}$  в диапазоне волн  $290\text{—}300 \text{ мкм}$ .

Продолжительность облучения устанавливается техническими условиями. Приблизительно продолжительность облучения определяется как частное от деления срока службы на «коэффициент ускорения», равный 18 для зоны умеренного климата и 12 для тропического климата.

Изделия считаются выдержавшими испытания, если параметры находятся в пределах норм, а при внешнем осмотре не обнаруживается изменение окраски по сравнению с окраской эталонного образца, отслаивания лакокрасочных покрытий и других дефектов.

**Испытание на высотность** [15] производится с целью определения устойчивости работы аппаратуры в среде с пониженным давлением при различных температурных режимах.

Аппаратура размещается в барокамере (термобарокамере), включение и измерение необходимых параметров производится в нормальных условиях, после чего она выключается. В камере устанавливается температура, соответствующая значению, указанному в ТУ. Давление в камере понижается до величины, устанавливаемой ТУ.

При пониженном давлении в камере аппаратура включается при максимальном напряжении питания и находится во включенном состоянии в течение 30 мин. Во время проверки работоспособности аппаратуры на соответствие требованиям ТУ не должно наблюдаться коронирования на поверхности деталей и перекрытия между токоведущими элементами, а должна обеспечиваться надежная коммутация электрических цепей. При испытаниях при пониженном давлении и положительных температурах на деталях и узлах аппаратуры, находящихся в тяжелом тепловом режиме, устанавливаются датчики температуры (термопары, термосопротивления, термокраска и т. п.).

После проверки надежности работы аппаратуры при пониженном давлении в соответствии с требованиями для данного вида испытания давление в камере повышается до нормального, аппаратура выключается, извлекается из камеры и подвергается внешнему осмотру с целью обнаружения трещин в изоляционных материалах, нарушения герметичности в конденсаторах и трансформаторах и т. п.

В условиях серийного производства радиоэлектронной аппаратуры рекомендуется строго соблюдать установленную в соответствии с правилами математической статистики и оговоренную в технических условиях периодичность проведения климатических и механических испытаний. Это позволяет точнее следить за стабильностью технологического процесса и своевременно его совершенствовать, добиваясь выпуска радиоаппаратуры, отвечающей требованиям эксплуатационной надежности.

### § 3. ЧЕЛОВЕК И ОБЪЕКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ

Жесткие требования, предъявляемые к современной радиоэлектронной аппаратуре (повышенная механическая прочность и надежность работы в условиях значительного перепада температур, высокой влажности и т. п.), оказывают влияние и на уровень контроля качества производства. С одной стороны, требование минимально возможного веса и габаритов, простоты управления в сочетании с высокой надежностью приводит к созданию конструкций с очень плотным монтажом и применением специальных малогабаритных узлов и деталей. С другой стороны, требования по выполнению аппаратурой многих функций с высокой точностью приводят к созданию сложных радиоэлектронных систем. Обеспечение надежности такого электронного оборудования, состоящего из разнообразных компонентов, особенно при изготовлении его мелкими сериями, ставит перед заводом-изготовителем сложную задачу по организации соответствующего контроля качества выпускаемой продукции.

Основные характеристики (параметры), определяющие качество изделия, можно измерять. К таким характеристикам относятся, например, величина зазора между сопрягающимися электрическими разъемами, сопротивление контактов реле, амплитуда импульса радиопередатчика и т. п. Эти характеристики изделия обычно являются непрерывными случайными величинами и могут иметь любое значение, лежащее в некоторых определенных пределах. Характеристики изделия могут быть и дискретными случайными величинами.

Изготовление сложного радиоэлектронного оборудования при мелкосерийном производстве имеет относи-



тельно длительный технологический цикл. Это требует систематического контроля не только качества выпускаемых изделий, но и всего производственного процесса. Достоверность выбранной методики контроля существенно зависит от характера и стабильности технологических процессов, которые подвергаются контролю, от физической сущности и взаимной связи отдельных составляющих технологических процессов и ряда других причин [18].

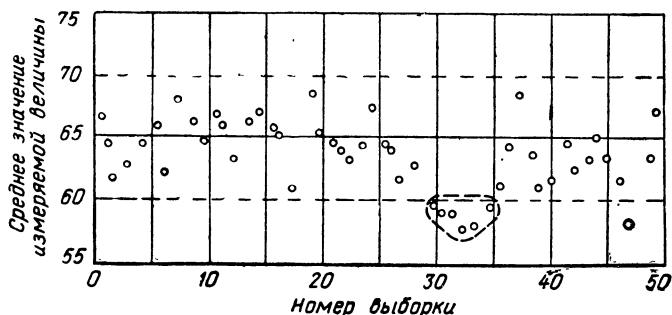


Рис. 3.1. Типичная контрольная карта производственного процесса (составлена на основании 50 выборок по 4 изделия каждая).

Основная цель контроля производства заключается в обеспечении контроля технологических процессов изготовления изделий как в заготовительных, так и в сборочных цехах. Очевидно, что все детали устройства и технологические операции без исключения в течение ограниченного отрезка времени проверить практически невозможно. Поэтому рекомендуется применять выборочный или статистический метод контроля процесса производства при условии достоверности такого контроля порядка 0,7—0,95. При выборочном контроле нет необходимости в 100%-ной проверке и испытании, а о качестве партии деталей, сборок судят только по некоторой ее части (выборке, пробе).

Характерным инструментом такого статистического метода контроля является контрольная карта, на которой изображаются результаты контроля последовательных выборок [16]. Типичная форма контрольной карты представлена на рис. 3.1. Она применима и при контроле производства сложной радиоэлектронной аппаратуры.

Контрольные графики, подобные изображенному на рис. 3.1, применяются не только для количественного анализа (средние значения, размах отклонения от среднего и т. д.), но и при альтернативной оценке (количество дефектов или процент дефектных изделий).

Если производственный процесс контролируется, то всегда можно осуществить правильную оценку качества выпускаемой продукции, и, следовательно, наиболее правильно выбрать эффективный метод проверки качества готовой аппаратуры.

До недавнего времени, независимо от величины серии изготавливаемых изделий, проверяя качество готовой продукции на соответствие ее чертежам и техническим условиям, человек-контролер являлся, по существу, лишь регистратором качества. Никакого воздействия на совершенствование технологии производства он не оказывал и роль его в производственном процессе была чисто пассивной. Считалось, что для полной (100%-ной) гарантии качества продукции необходима 100%-ная проверка выпускаемой аппаратуры. Но при таком контроле, начиная с некоторого момента, возможность ошибки человека-контролера значительно возрастает. Наступление этого момента зависит от многих причин: состояния здоровья человека, предыдущей нагрузки, тренированности и т. п., и может меняться даже в течение рабочей смены несколько раз.

Для уменьшения влияния на надежность качества контроля выпускаемых изделий субъективных ошибок человека, объективных ошибок измерений, обусловленных состоянием контрольно-измерительной аппаратуры и т. п., рекомендуется уменьшать время, затрачиваемое человеком на контроль, т. е. применять выборочный контроль качества готовой продукции.

Выборочный контроль обладает сравнимой или даже большей достоверностью, чем 100%-ный, начиная только с некоторого (достаточно большого) количества контролируемых изделий. Этот метод контроля качества дает хороший эффект при серийном и массовом производстве радиодеталей и элементов, а также на входном контроле комплектующих элементов. При мелкосерийном производстве сложной радиоэлектронной аппаратуры, состоящей из большого числа разнородных по своему составу и назначению блоков и узлов, этот метод нельзя

рекомендовать для контроля готовых изделий. Но он часто применим и в этом случае при контроле качества изготовления деталей и узлов многократного действия.

При мелкосерийном производстве сложных радиоэлектронных устройств, как правило, предусматривается 100%-ный контроль качества выпускаемых изделий.

За время проверки современного радиоэлектронного блока или узла на соответствие его чертежам и частным техническим условиям приходится измерять большое количество параметров. При отсутствии автоматизации процессов контроля измерение параметров занимает много времени. Причем, значительная часть этого времени расходуется не на непосредственное измерение параметров, а на подключение и отключение измерительных приборов. Так, например, на контроль электрических параметров типового блока, формирующего импульс поджига тиратрона в модуляторе, с помощью приборов общего применения затрачивается два часа: полчаса на измерение параметров и полтора часа на операции по отключению и подключению необходимой контрольно-измерительной аппаратуры.

Значительная часть параметров, проверяемых в процессе изготовления, контролируется в условиях эксплуатации. Наличие встроенных автоматизированных систем функционального контроля параметров, прогнозирования и отыскания отказов увеличивает надежность при эксплуатации и облегчает контроль в производстве.

Автоматизация контрольных операций при мелкосерийном производстве позволяет:

- существенно уменьшить время на проведение контрольных операций при приемо-сдаточных испытаниях и отыскание отказов при настройке и регулировке;

- производить непрерывное наблюдение за изменениями параметров при технологическом прогоне аппаратуры и периодических испытаниях;

- сократить номенклатуру или даже совсем исключить комплект переносной контрольно-измерительной аппаратуры;

- снизить требования к квалификации контролеров и уменьшить их численность;

- улучшить достоверность проверки параметров;

- автоматически регистрировать результаты контроля.

Большой объем разнообразных по принципу построения и назначению устройств, комплектующих сложную радиоэлектронную систему, может привести к тому, что техническая документация, поступающая на сборочный завод, будет иметь ошибки. Это связано, в основном, со сжатыми сроками разработки, текущими доработками по уточнению режимов работы схем, задержкой с внесением изменений в хранящиеся у разработчика подлинники (белки) чертежей или оригиналы (кальки). Копии чертежей для изготовления и контроля аппаратуры, отпечатанные с неисправленных оригиналов, приведут к проверке по неправильным чертежам.

Ошибки в чертежах появляются и на сборочных заводах, но в меньших количествах, так как на заводах в чертежи вносятся меньше изменений. Процесс разработки сложных систем часто не заканчивается в стенах организации-разработчика, а как бы переносится на серийный завод и продолжается в процессе изготовления установочной партии этих изделий. Вот здесь-то и приобретает особое значение роль человека-контролера качества.

Задача человека-контролера качества и, в частности, надежности на этапе освоения нового изделия должна заключаться не только в том, чтобы заметить те или иные дефекты, допущенные при изготовлении, но также прогнозировать возможность возникновения неисправностей, появление которых не всегда очевидно, и стать как бы источником «обратной» информации для разработчика, его первым помощником и в вопросах отработки чертежей, режимов работы схем, конструкций, того или иного блока, узла или системы, обеспечения при серийном производстве их основных свойств безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

# РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ СЛОЖНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И ПРОИЗВОДСТВО

### § 1. РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ КАК СВОЙСТВО РАДИОАППАРАТУРЫ МНОГОКРАТНОГО ДЕЙСТВИЯ

С незапамятных времен, полагаясь на собственное мастерство и природные возможности, человек занимается техническим обслуживанием. Простые по конструкции и неприхотливые в эксплуатации многие изделия в прошлом имели ограниченные потребности в ремонте. За последние годы в связи с созданием сложных электромеханических и электронных устройств потребности в техническом обслуживании резко возросли, правда, при расширении и человеческих возможностей. Одновременно во многих случаях расходы, связанные с обслуживанием современной радиоэлектронной аппаратуры, стали в десятки раз превосходить ее первоначальную стоимость. Поэтому сокращение расходов на техническое обслуживание и времени восстановления и ремонта являются в настоящее время одним из основных условий достижения высокой эксплуатационной надежности сложной радиоэлектронной аппаратуры.

Ремонтопригодность — свойство изделия, заключающееся в приспособлении его к обнаружению и устранению отказов, а также к их предупреждению. Под ремонтопригодностью изделия одноразового действия понимается его приспособленность к проверке технического состояния и удобной замене другим изделием,

Из данного определения можно заключить, что ремонтпригодность — это основное свойство радиоэлектронной аппаратуры многократного действия. Аппаратура многократного действия — или восстанавливаемая — должна соответствовать всем критериям ремонтпригодности, а одноразового действия — только той их части, которая относится к поддержанию изделий в состоянии готовности для выполнения своего назначения. Аппаратура одноразового действия в случае возникновения отказа в режиме активной эксплуатации восстановлению не подлежит. Действительно, аппаратура радиостанций и телецентров, радиолокационных и связных установок различного назначения, при возникновении в ней отказа или неисправности должна при замене отказавшего элемента, узла или блока обеспечивать возможность восстановления необходимых качеств для выполнения своего целевого назначения. В то же время, применительно к аппаратуре управляемых реактивных снарядов типа Фолкон [20], ремонтпригодность — это приспособленность к проверке технического состояния аппаратуры для поддержания боевой готовности, т. е. любой снаряд может быть снят с хранения в любой момент времени между регулярными проверками, подвешен на истребитель-перехватчик и применен в качестве оружия с заданной высокой вероятностью выполнения задания.

Для правильного понимания термина «ремонтпригодности» в случае восстанавливаемой радиоэлектронной аппаратуры (аппаратуры многократного действия) необходимо учитывать наличие двух основных видов ремонта: текущего и профилактического.

Текущий ремонт представляет собой выполнение тех или иных необходимых в данном конкретном случае операций по восстановлению исправности аппаратуры. Он является внеплановым и выполняется, как правило, после того, как обнаруживается отказ или такая неисправность, устранить которую необходимо до возобновления использования аппаратуры, так как в противном случае может наступить отказ в режиме активной эксплуатации (прогнозируемый отказ).

Профилактический ремонт (иначе, профилактика, регламентные работы или планово-предупредительный ремонт) — это периодическое выполнение отдельных за-

ранее запланированных обязательных операций над аппаратурой (чистка, смазка, регулировка, регламентированная замена некоторых деталей без предварительной проверки их фактического состояния и т. п.). Профилактический ремонт планируется и производится независимо от наличия или отсутствия отказов и неисправностей в период между двумя соседними профилактиками и предназначен для уменьшения вероятности отказов в режиме активной эксплуатации.

Профилактический и текущий ремонты можно производить полностью или частично, когда аппаратура не работает. Поэтому нужно не только различать вид ремонта, но и учитывать состояние аппаратуры. Эти соображения необходимы для оценки показателей ее ремонтпригодности. Сочетание профилактического и текущего ремонта понимается как техническое обслуживание аппаратуры. Ремонт может быть различных видов по своей сложности: от замены сгоревшего предохранителя до полной разборки и проведения сложных восстановительных работ при среднем и капитальном ремонте, когда объем ремонтных работ соизмерим с затратами труда на изготовление нового изделия.

При мелкосерийном производстве сложной радиоэлектронной аппаратуры, из-за достаточно большой длительности технологического цикла ее изготовления, во время настройки и регулировки, приемо-сдаточных испытаний и при технологическом прогоне инженерно-техническому составу завода-изготовителя приходится заниматься техническим обслуживанием. Следовательно, те свойства изделия, которые характеризуют его приспособленность к выполнению любого ремонта, могут и должны оцениваться применительно к реальным условиям эксплуатации еще в условиях серийного производства.

Такой оценкой приспособленности к ремонту, по-видимому, могут служить затраты средств, труда и времени, необходимые для осуществления ремонта данного изделия с применением штатного инструмента и приборов, а также уровень квалификации, которым должен обладать штатный обслуживающий персонал, чтобы он мог ремонтировать это изделие. Чем выше ремонтпригодность аппаратуры, тем быстрее выполняется ее ремонт, тем меньше при этом затраты труда и средств,

тем ниже требования к подготовке соответствующего обслуживающего персонала. Возможные логические ступени ремонта любой радиоаппаратуры можно представить графически (рис. 4.1). На графике показано также, сколько в среднем общего ремонтного времени затрачено на каждую логическую ступень:

- обнаружение неисправности;
- отыскание неисправного элемента;
- установление характера неисправности;
- восстановление аппаратуры;
- окончательная проверка для того, чтобы убедиться, что неисправность ликвидирована.



Рис. 4.1. Поточный график текущего ремонта.

Этот поточный график охватывает все время бездействия системы, вызванное неисправностью. Здесь не показаны, но подразумеваются затраты времени на получение контрольно-измерительных приборов и инструментов, деталей для замены, на чтение чертежей и инструкций и, конечно, всякие непредвиденные потери времени в течение ремонта, вызванные посторонними причинами.

Обычно техническое обслуживание измеряют временем, при этом некоторые числовые критерии характеризуют требования к ремонтпригодности, на основании которых при работе с аппаратурой можно надлежащим образом планировать средства ее материально-технического обеспечения [19].

К этим критериям можно отнести:

1. Среднее время восстановления аппаратуры  $T_{во}$ , т. е. среднее время, затрачиваемое на отыскание и устранение одного отказа или неисправности. Поскольку оперативная готовность аппаратуры является основным требованием, то этот критерий можно включать в тех-



нические требования, предъявляемые к текущему ремонту.

2. Диапазон времени простоя, приходящегося на один отказ. Ремонтным организациям помимо величины ремонтпригодности желательно иметь практический числовой показатель, указывающий диапазон времени простоя по большому числу неисправностей. Наиболее целесообразно указывать диапазон, охватывающий приблизительно 90% всех возможных неисправностей.

3. Время на каждую операцию профилактического ремонта. Этот критерий особенно важен для такой аппаратуры, в которой плановый ремонт должен занимать минимальное время. Человек, работающий с аппаратурой, может определить требуемое время непосредственно по этому показателю.

4. Объем профилактического ремонта в человеко-часах. Этот показатель учитывает требуемое время профилактического ремонта аппаратуры.

5. Готовность. Этот показатель выражается через коэффициент готовности аппаратуры к выполнению заданных функций или, иначе говоря, коэффициент готовности представляет собой вероятность того, что в произвольный момент времени аппаратура будет находиться в состоянии готовности. Коэффициент готовности может быть найден по отношению наработки аппаратуры за определенный период эксплуатации к сумме этой наработки и продолжительности ремонтов за тот же промежуток времени:

$$K_r = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рем}}},$$

где  $t_{\text{раб}}$  — средняя наработка аппаратуры, измеренная за достаточно большой промежуток времени (например, за год);

$t_{\text{рем}}$  — средняя продолжительность ремонтов за тот же промежуток времени.

6. Показатель (норма) ремонтпригодности. Этот критерий достаточно полно описывается коэффициентом технического использования, который выражается через отношение:

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}} + T_{\text{пр}}},$$

где  $T_{\text{раб}}$  — полный технический ресурс, т. е. суммарная наработка изделия за период эксплуатации до разрушения или другого предельного состояния; этот параметр рассчитывается от начала до конца эксплуатации;

$T_{\text{рем}}$  — суммарное время, затраченное на ремонт за весь период эксплуатации;

$T_{\text{пр}}$  — суммарное время, затраченное на профилактические работы за весь период эксплуатации.

Поясним два последних понятия на примере. Допустим, что полный технический ресурс радиопередатчика составляет 10 000 час. За период эксплуатации на ремонт было затрачено 1 100 час, на профилактические работы 900 час. Тогда коэффициент технического использования будет

$$K_{\text{ти}} = \frac{10\,000}{10\,000 + 1\,100 + 900} = 0,83 = 83\%,$$

а коэффициент готовности

$$K_{\text{г}} = \frac{10\,000}{10\,000 + 1\,100} = 0,9 = 90\%.$$

Отсюда нетрудно видеть, что чем меньше время, затрачиваемое на ремонт и профилактику, тем больше величина коэффициента технического использования и коэффициента готовности приближается к единице, так как все наработанное время за период эксплуатации (100%) используется по назначению, а простой аппаратуры сокращается до минимума.

Помимо среднего времени восстановления, которое является количественным критерием ремонтпригодности, существуют и другие критерии, которые выступают на передний план в зависимости от назначения аппаратуры, например:

— минимальный расход средств (по всем факторам);

— минимальная опасность травмирования обслуживающего персонала и т. д.

Ремонт одного и того же изделия может выполняться быстрее или медленнее, дешевле или дороже, более или менее опытным персоналом не только в зависимости от

ремонтпригодности изделия, но и в зависимости от степени организованности в проведении ремонта, от обеспеченности необходимой руководящей документацией, оборудованием, запасными частями и т. д.

Поэтому все упомянутые выше показатели характеризуют ремонтпригодность лишь относительно. В этом заключается одно из наиболее существенных затруднений, мешающих получению однозначных абсолютных оценок ремонтпригодности. Очевидно, что такие оценки могут быть получены лишь при непосредственном количественном и качественном анализе конкретных конструкций радиоэлектронного оборудования некоторым объективным критерием ремонтпригодности как при проектировании, так и при изготовлении.

При мелкосерийном производстве радиоэлектронной аппаратуры многократного действия для контроля ремонтпригодности блока, узла или системы наиболее эффективно могут быть использованы три реальных критерия:

- время, потребное на ремонт,
- коэффициент готовности,
- стоимость содержания аппаратуры на протяжении всего ее срока службы.

Каждый из этих критериев можно рассчитать для конкретного типа изготавливаемой конструкции с тем, чтобы лица, ответственные за разработку и выпуск изделий, могли правильно судить о конечной ремонтпригодности в условиях эксплуатации уже на этапе изготовления установочной партии. Степень важности получаемых величин необходимо определять исходя из назначения аппаратуры. Например, время, потребное на устранение неисправностей, и быстрое прохождение аппаратуры по каналам ремонтной службы не будет иметь особого значения там, где аппаратура не предназначена к использованию «по тревоге», и, наоборот, эти факторы будут весьма важны там, где аппаратура предназначена к использованию в чрезвычайных условиях. Наилучшее конструктивное решение — это такое решение, при котором будет достигнут успешный компромисс между стоимостью изделия и величиной этих критериев.

Для того чтобы ощутить масштабность вопроса оценки ремонтпригодности современных радиоэлектронных

устройств, назовем лишь основные факторы, которые влияют на ремонтпригодность. К ним относятся:

- конструктивные особенности обслуживаемой аппаратуры;

- рабочие характеристики обслуживаемой аппаратуры;

- контрольно-измерительное оборудование;

- инструменты;

- организация обслуживания;

- подготовка и опытность обслуживающего персонала;

- инструкции и руководства;

- производственная база;

- запасные части;

- организация снабжения.

Ремонтпригодность каждой конкретной аппаратуры зависит от того, насколько эффективно решаются вопросы, связанные с каждым из этих факторов, а также насколько учтено их относительное значение. Рассмотрим связь мелкосерийного производства радиоэлектронной аппаратуры с некоторыми из перечисленных выше факторов, а следовательно, и возможности производства по улучшению ремонтпригодности радиоэлектронных систем многократного действия. Любое рассмотрение ремонта должно основываться, помимо выбранного вида аппаратуры, на четырех основных элементах: человек, контрольно-измерительные приборы, руководство по ремонту и запасные части.

## § 2. КОНСТРУКЦИЯ И РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ

Требование «упростить обслуживание» достаточно выразительно отражает мнение тех, кто осуществляет техническое обслуживание современной сложной радиоэлектронной аппаратуры или расходует на это средства. При конструировании радиоэлектронной аппаратуры обычно учитывают требования по обслуживанию в условиях ремонтных мастерских, и очень часто забывают о выполнении требований к ведению ремонта в условиях эксплуатации. Такое положение объясняется недостаточным интересом со стороны отдельных конструкторов к проблеме ремонтпригодности и в некоторой степени отсутствием у них практики технического обслуживания, что особенно важно в случае военной радиоэлек-

тронной аппаратуры [20], где необходимо строго учитывать методы обслуживания и ремонта, принятые в войсках. Военная аппаратура считается не отвечающей требованиям ремонтпригодности, если ее ремонт невозможен в полевых условиях, несмотря на простоту такого ремонта для промышленных организаций. Правильная разработка схем, блоков и всей конструкции — это основа ремонтпригодности.

В процессе конструирования и производства необходимо внимательно анализировать ремонтпригодность конструкции с точки зрения ее соответствия реальной квалификации соответствующего обслуживающего персонала и организации обслуживания.

Какие же особенности должны быть внесены в конструкцию современных сложных радиоэлектронных устройств с тем, чтобы облегчить их обслуживание? Обязательно должны учитываться условия эксплуатации тех или иных видов аппаратуры и ее назначение. Однако некоторые конструктивные решения, обеспечивающие высокую ремонтпригодность, могут быть общими для любого радиоэлектронного оборудования. К ним можно отнести:

- обеспечение рациональной компоновки и размещения функционально связанных элементов, блоков и узлов;

- резервирование всей аппаратуры или отдельных ее частей;

- обеспечение свободного доступа ко всем блокам и узлам, ко всем контрольным точкам, а также ко всем элементам аппаратуры;

- достаточная освещенность всех мест размещения аппаратуры и т. д.

При оценке тех или иных конструктивных решений с точки зрения ремонтпригодности следует учитывать психофизиологические данные человека. Человек, занимающийся ремонтом, обладает строго определенными физическими возможностями. Например, рука человека может сгибаться только в определенных направлениях. Рука и кисть человека имеют определенный размер и определенную силу. При работе с помощью инструментов или в перчатках ему потребуется больше пространства, чем при работе без них. При этом возникают трудности в обслуживании, обусловленные миниатюриза-

цией аппаратуры. Например, кнопка включения должна быть больше по размерам и больше выступать на поверхности при работе в перчатках, чем при работе голыми руками.

В некоторых случаях радиоэлектронная аппаратура многократного действия полностью резервируется. В ряде систем этот принцип используется частично, причем там, где это имеет наибольшее значение. Необходимо понимать, что резервирование радиоаппаратуры в любой форме представляет собой лишь разновидность ремонта без снятия с эксплуатации. Более того, это своеобразный случай отсроченного текущего ремонта. Вместо того, чтобы снимать неисправную деталь и устанавливать вместо нее запасную, последняя устанавливается заранее, а фактическая работа по устранению неисправности откладывается до какого-то ремонта в будущем.

К резервированию всей системы прибегают в тех случаях, когда крайне необходимо избежать каких бы то ни было перерывов в работе материальной части. Иногда в рабочем состоянии находятся одновременно две системы, хотя фактически работает только одна. Такой способ резервирования называют нагруженным резервированием. Частичное резервирование находит широкое применение в бортовой аппаратуре космических объектов, если требования к полезной нагрузке позволяют пойти на это, и в наземных радиоэлектронных системах применительно к некоторым элементам и блокам, отличающимся низкой надежностью.

Можно считать, что надежность является во всех отношениях основой подхода к ремонтпригодности. Однако, как показывает опыт, надежность не единственное и всеобъемлющее свойство системы, определяющее размещение отдельных частей и компоновку аппаратуры в целом. Гораздо чаще размещение блоков и узлов сложных систем диктуется соображениями радиоэлектроники и механики. Это объясняется тем, что техническая эффективность аппаратуры является доминирующим показателем по сравнению с ремонтпригодностью. Но даже и в этом случае в интересах ремонтпригодности в конструкции аппаратуры должны быть предусмотрены, где только возможно, и свободный доступ к узлам и блокам, и применение блочных элементов и т. п. Конструктивные недостатки с точки зрения до-

ступности и тяжелые условия работы современных радиоэлектронных устройств примерно поровну повинны в простоях аппаратуры.

Как показывают наблюдения, проведенные в США на информационных постах эсминцев и авианосцев класса «Эссекс», значительная часть времени, в течение которого штатное радиоэлектронное оборудование бездействует, приходится в настоящее время на обеспечение доступа к нужному элементу (для индикатора типа SPA-8A оно составляет 2 час). Остальное время тратится на отыскание неисправности, на установку запасных частей и контроль функционирования. Поэтому уже в заводских условиях при замене отказавшего элемента, настройке и последующей проверке его функционирования необходимо оценивать, какое пространство уже есть и каким оно должно быть для обеспечения свободного доступа при ремонте.

При блочном исполнении аппаратуры компоновка и размещение ее должны отвечать следующему минимуму требований:

- доступ к каждому блоку должен быть обеспечен в основном спереди;

- блоки должны быть выдвижными, устанавливаемыми на направляющие ролики для обеспечения доступа к внутреннему монтажу, к радиолампам, к элементам схемы и контрольным точкам;

- каждый блок должен эвакуироваться отдельно и полностью из шкафа или кожуха за ручки или кольца;

- для проведения ремонта на месте, без разборки, должны быть предусмотрены соответствующие приспособления;

- идентичные блоки должны быть полностью взаимозаменяемыми, т. е. замена неисправного блока и узла не должна требовать каких-либо последующих регулировок и настроек;

- запасные легкосменные блоки для уменьшения времени восстановления надо стремиться размещать в том же помещении (в тех же шкафах, что и основное оборудование);

- размещение шкафов и стоек с блоками должно производиться с учетом всех особенностей помещения, в котором предусматривается работа данной аппаратуры.

В подвижных объектах радиоэлектронное оборудование очень часто размещают в ущерб его доступности, что иногда при ремонте приводит к повреждению смежных блоков. Прогрессивная тенденция конструирования сложных комплексов аппаратуры заключается в отказе от ремонта, связанного с применением инструмента на месте. Это положение особенно важно для схемы и конструкции модулей. Для создания эффекта квазимассового производства сложной мелкосерийной аппаратуры и уменьшения объема ЗИП по модулям номенклатура последних не должна превышать нескольких процентов от общего количества. Для аппаратуры крупносерийного и массового производства номенклатура должна составлять небольшую часть от числа модулей, используемых при месячном выпуске аппаратуры.

Функциональный объем, режимы работы элементов и конструкция модулей должны обеспечивать существенно более низкую частоту отказов (как внезапных, так и параметрических), чем сумма средних статистических частот отказов входящих элементов при их использовании вне модульных конструкций. Это предполагает относительно более тщательную и длительную электрическую, конструктивную и технологическую отработку унифицируемых модулей по сравнению с отработкой частных конструкций. Относительное увеличение сроков отработки модулей в случае успеха должно окупаться существенным сокращением сроков разработки аппаратуры в модульном построении. Так, низкочастотные промышленные герметизированные модули (триггеры, мультивибраторы и т. п.) киевского завода «Реле и автоматика» имеют частоту отказов  $(0,2—0,5) \cdot 10^{-5}$ , т. е. величину, близкую к среднестатистическому значению частоты отказов отдельного транзистора при обычном использовании последнего в аппаратуре [17].

Большие перспективы с точки зрения повышения надежности обещают новые методы оптимизации внутренних параметров модулей путем моделирования их режимов на ЭВМ с учетом статистических закономерностей изменения параметров входящих деталей и элементов монтажа.

На рис. 4.2 показан один из модулей, применяемых в новом доплеровском радиолокаторе, выпущенном американской фирмой Bendix. Такой тип конструкции



отличается исключительно плотной компоновкой и монтажом. Вместе с тем выдвижные платы обеспечивают свободный доступ практически к любому элементу схемы. Очевидно, что такая или подобная ей компоновка

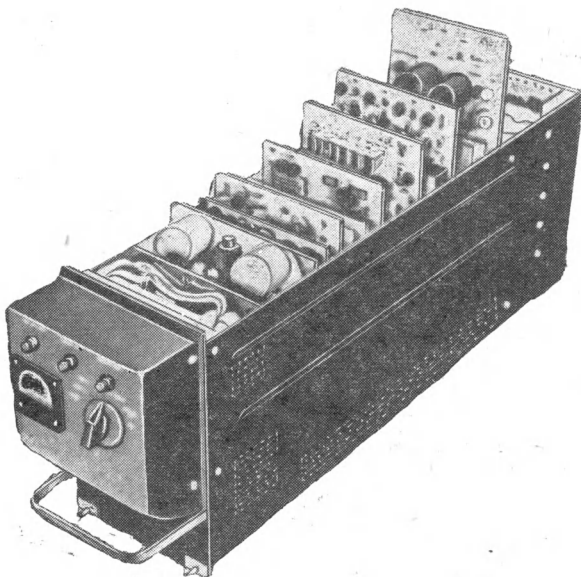


Рис. 4.2. Образец модульной конструкции, применяемой в доплеровской радиолокационной аппаратуре на полупроводниках.

конструкции обеспечит необходимую доступность элементов и в будущих системах, несмотря на дальнейшую миниатюризацию и растущую сложность радиоэлектронной аппаратуры.

### § 3. КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТЬ СЛОЖНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Существенную роль в сокращении длительности проведения ремонта играют контрольно-измерительные приборы. Контрольно-измерительные приборы могут быть как встроенные, т. е. конструктивно объединенные совместно с соответствующим блоком или узлом, так и пе-

реносные. Проблема контролепригодности для постоянно усложняющейся радиоаппаратуры заключается в умении наиболее правильно с точки зрения готовности системы выбрать контрольные точки и обеспечить системе необходимыми контрольно-измерительными приборами для проведения контроля работоспособности и ремонта (восстановления).

В современных сложных системах одновременно с включением аппаратуры автоматически включается система контроля. Основой системы контроля сложных систем являются непрерывно работающие устройства допускового контроля. Система контроля строится по принципу пирамиды, с уменьшением объема и подробности информации от низших звеньев управления к высшим. Информация допускового контроля уточняется при необходимости системой приборов, измеряющих точное значение параметров режимов аппаратуры. Эффективность системы контроля может быть резко повышена путем применения сквозного, имитационного контроля (иногда называемого функциональным) и предварительной логической обработки внутренних сигналов контроля с целью быстрого уточнения места и характера неисправности на основании первичной информации, полученной от ограниченного числа точек контроля [28].

Результаты контроля в случае необходимости могут быть использованы для регулировки качества наблюдаемых процессов. Индикация неисправности отдельных элементов или блоков может позволить быстро провести их смену или ремонт и тем самым способствовать продолжению нормального функционирования аппаратуры. Для оптимального размещения и индикации контрольных точек требуется опыт и инженерная интуиция. Слишком большое количество таких точек чрезмерно усложняет контрольные операции при обслуживании переносными приборами и приводит к излишнему росту элементов в случае встроенного и автоматизированного контроля, т. е. снижает надежность контроля и влияет на общую эксплуатационную надежность системы.

При производстве сложных радиоэлектронных систем различные экземпляры аппаратуры, ее состав и режимы работы элементов могут претерпевать существенные изменения. Настройка и регулировка аппаратуры, текущий и профилактический ремонт как при работе

с отдельными блоками, так и при сопряжении их в законченные системы, позволяют довольно точно оценить еще при изготовлении количество необходимых контрольных точек и удобство контроля при ремонте.

Требования к контролепригодности современной сложной радиоэлектронной аппаратуры определяются условиями ее применения. Действительно, ремонтпригодность оценивается количеством времени, затрачиваемым на восстановление первоначальных свойств системы. Анализ показывает, что порядка 70% времени, в течение которого любая аппаратура бездействует (пока проводится текущий ремонт), уходит на локализацию места неисправности. Это не только занимает основную долю времени, но и больше всего напрягает способности обслуживающего персонала.

В зависимости от назначения и методов применения контролируемой аппаратуры оценка эффективности системы контроля может изменяться. В тех случаях, когда объектом контроля является аппаратура непрерывного действия, основной показатель эффективности связан с уменьшением времени восстановления и улучшением  $K_r$ , а также коэффициента использования работающей аппаратуры. В случае, когда контролируется аппаратура однократного действия (невосстанавливаемая в режиме активной эксплуатации), основной показатель эффективности контроля связан с достоверностью и удобством предварительного определения готовности оборудования к использованию в режиме активной эксплуатации.

В реальной аппаратуре обычно имеют место оба случая использования аппаратуры контроля. С методологической точки зрения удобно рассматривать контроль аппаратуры непрерывного и однократного действия раздельно.

В первом приближении в качестве показателя эффективности контроля аппаратуры непрерывного действия можно рассматривать величину

$$E = \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda_k}{\lambda_c}\right) \left(1 + \frac{T_{от}}{T_y}\right)} = \frac{\lambda_c T_y}{(\lambda_c + \lambda_k)(T_{от} + T_y)},$$

где  $E$  — показатель эффективности встроенного контроля;

- $\lambda_K$  — интенсивность отказов аппаратуры встроенного контроля;  
 $\lambda_c$  — интенсивность отказов системы (без учета элементов аппаратуры встроенного контроля);  
 $T_{от}$  — среднее время на отыскание одной неисправности в системе;  
 $T_y$  — среднее время на устранение одной неисправности в системе.

Этот показатель эффективности равен отношению среднего времени простоя на один час работы при идеальной системе контроля к среднему времени простоя на один час работы при реальной системе контроля, в предположении, что отказ контрольной аппаратуры приводит к отказу системы. Под идеальной системой в данном случае понимается система, в которой интенсивность отказов аппаратуры встроенного контроля и время отыскания любой неисправности равны нулю, т. е.  $\lambda_K=0$  и  $T_{от}=0$ . В реальной системе хотя бы одно из этих условий не выполняется. Эффективность встроенного контроля в идеальной системе, как следует из приведенного уравнения, равна единице. Наоборот, плохая, чрезвычайно ненадежная аппаратура встроенного контроля ( $\lambda_K \rightarrow \infty$ ) будет иметь эффективность, близкую к нулю.

При использовании такого показателя эффективности встроенного контроля коэффициент готовности системы

$$K_r \approx \frac{E}{\lambda_c T_y + E},$$

учитывая, что  $\lambda_c + \lambda_K = \lambda$  и  $T_{от} + T_y = T$ , будет тем больше, чем больше эффективность встроенного контроля. Введение критерия эффективности встроенного контроля дает возможность сравнивать различные варианты аппаратуры встроенного контроля и благодаря этому позволяет в первом приближении выбирать при проектировании оптимальный вариант аппаратуры контроля. В действительности коэффициент готовности превышает  $K_r$ , рассчитанное по приведенной формуле, так как отказ аппаратуры контроля не всегда означает отказ системы.

Различают два метода контроля работоспособности радиоэлектронного оборудования в процессе эксплуатации. Один метод основывается на непрерывном сравне-

нии фактических значений рабочих параметров с номинальными, в пределах оговоренных допусков, т. е. имеющих на данный текущий момент времени. Вторым методом предполагает использование выборочных проверок на функционирование или решение так называемых контрольных задач. Результат контроля в этом случае сравнивается с известным результатом для работоспособного оборудования. Выбор способов индикации результатов контроля для встроенных контрольно-измерительных приборов в зависимости от принятого метода измерения должен обеспечивать не только необходимую точность того или иного измерения, но и упрощать до минимума методы отыскания и устранения неисправностей.

При визуальном использовании встроенного контрольно-измерительного прибора очень удобными оказываются индикаторы типа «да — нет», поскольку они позволяют свести к минимуму количество решений по ремонту, которые в сильной мере усложняют работу обслуживающего персонала и без того обычно обремененного решением задач, связанных с оперативным использованием обслуживаемой аппаратуры. Простейшей формой индикации типа «да — нет» является световая сигнализация. Иногда она применяется совместно со звуковой сигнализацией, снимающей необходимость непрерывного наблюдения за световым полем сигналов контроля.

Применение встроенных контрольно-измерительных приборов с индикацией типа «да — нет» в наземном радиоэлектронном оборудовании значительно упрощает его техническое обслуживание. Кроме того, допусковой контроль удобен для дистанционной передачи, что позволяет более рационально использовать обслуживающий персонал. Применение встроенных контрольно-измерительных приборов для бортовой аппаратуры в основном определяется теми же соображениями, но при более жестких ограничениях по весу и габаритам.

Для сложной радиоэлектронной аппаратуры, применяемой в чрезвычайно ответственных случаях, требующих ее постоянной готовности, исключительное значение приобретает автоматизация контроля параметров, отыскания и прогнозирования отказов. Говоря о системах межконтинентальных баллистических ракет, требующих

огромной сети наземного вспомогательного оборудования (пусковых установок, подъемных кранов, систем заправки топливом, больших систем энергоснабжения и, следовательно, сотен шкафов с блоками), нельзя представить их постоянную боевую готовность без наличия устройств автоматического контроля и отыскания неисправностей [20].

В таких случаях автоматическая контрольная аппаратура строится совместно с многофункциональными программируемыми вычислительными машинами. В прошлом уже приходилось прибегать к расширению возможностей человека по использованию сложных систем с помощью сервомеханизмов и специальных схем. Нечто подобное можно применять и в области устранения неисправностей, стремясь к оптимальному сочетанию способностей человека и возможностей машины. Съемные блоки со штепсельными соединениями, широко используемые теперь во многих образцах радиоэлектронной аппаратуры, в основном служат для повышения ремонтпригодности.

Дальнейшая разработка и внедрение автоматизации контрольной аппаратуры должны идти по пути создания устройств, не только указывающих объект ремонта, но и автоматически включающих резервные цепи без прерыва функционирования аппаратуры. Должна найти широкое применение также автоматическая самодиагностирующаяся и саморегулирующаяся аппаратура, которая обеспечивает уверенную работу в допустимых пределах. С ней могут совмещаться устройства, предназначенные для сигнализации о невозможности автоматического восстановления параметров в пределах допуска. Необходимо указать на перспективы применения встроенной аппаратуры прогнозирования отказов, т. е. контрольно-измерительной и вспомогательной аппаратуры, назначение которой заключается в обнаружении элементов и частей аппаратуры, вероятность отказа которых в ближайшее время резко возросла и которые поэтому следует сменить (подрегулировать), не дожидаясь отказа.

Измерительную и контрольную аппаратуру целесообразно строить на базе унифицированных малогабаритных функциональных узлов высокой нормированной надежности.

Применение встроенных систем автоматизированного контроля позволит значительно повысить надежность и эффективность использования радиоэлектронного оборудования за счет следующих факторов:

- уменьшения времени восстановления неисправного оборудования;

- уменьшения времени проверки, позволяющего повысить частоту проверок;

- прогнозирования приближения отказа элемента контролируемого оборудования.

Для выполнения указанных задач система автоматизированного контроля должна отвечать следующим требованиям:

- иметь относительно высокую надежность;

- обеспечивать достаточную полноту и точность проверок;

- иметь приспособления для самопроверки;

- обеспечивать возможность прогнозирования отказов элементов и частей контролируемого оборудования;

- обладать достаточным быстродействием;

- уменьшать стоимость эксплуатации оборудования в целом.

Очевидно, что часть этих требований является противоречивой. Например, чем выше требования к достоверности результатов проверки, тем больше информации необходимо получать о состоянии контролируемого оборудования, что приведет к увеличению сложности системы автоматизированного контроля. В свою очередь, с увеличением сложности снижается уровень надежности аппаратуры контроля и увеличивается стоимость оборудования в целом. Поэтому требования к системе автоматизации контроля могут быть определены только для конкретной системы с учетом ее назначения и условий эксплуатации.

#### **§ 4. ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ И РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ**

Инструкция по техническому обслуживанию — это эксплуатационный документ, которым персонал, занимающийся обслуживанием, пользуется повседневно в своей практической деятельности. От того, насколько полно, просто и ясно он составлен, настолько качествен-

но будет проводиться обслуживание доверенной ему аппаратуры. Всякая инструкция по техническому обслуживанию современных сложных радиоэлектронных систем должна быть рассчитана на определенный и возможно минимальный уровень подготовки обслуживающего персонала. Составленная с учетом всех эксплуатационных особенностей и уточненная в процессе производства инструкция по техническому обслуживанию — это эффективный способ увеличения времени полезной работы сложной радиоэлектронной аппаратуры, т. е. сокращение времени, затрачиваемого на ремонт и профилактику.

Часто завод-изготовитель снабжает свою продукцию инструкциями по проведению проверок и ремонта в точном соответствии с заводскими условиями. Испытания, проводимые на заводе (приемо-сдаточные и периодические), призваны показать, что аппаратура полностью отвечает требованиям заказчика, оговоренным в технических условиях. Эти испытания также должны показать, что аппаратура может выполнять все функции, оговоренные для нее при разработке. Обычно методика этих испытаний и проверок не соответствует условиям и организационным формам эксплуатации, а также квалификации обслуживающего персонала. Поэтому в отработке инструкции по техническому обслуживанию должны обязательно принимать участие представители заказчика, знающие с достаточной полнотой условия работы и методы обслуживания каждого конкретного образца аппаратуры.

Инструкция по техническому обслуживанию, придаваемая заводом-изготовителем вместе с выпускаемой продукцией, должна содержать конкретные практические указания по проведению контроля функционирования, планово-предупредительных или регламентных работ, а также наиболее полные сведения по возможным неисправностям и отказам и методам их устранения для ускорения текущего ремонта. Инструкция должна быть оформлена в виде, удобном для пользования. К инструкции должны прилагаться все необходимые схемы и чертежи. Можно предложить оформление инструкции с вкладными листами и съемным переплетом с тем, чтобы облегчить внесение необходимых добавлений и исправлений. Американская фирма Bendix вкладывает



В инструкции по эксплуатации дополнительные экземпляры всех схем, выполненных на кальке. Это позволяет организациям, эксплуатирующим данную аппаратуру, легко получить необходимое количество копий для техников, работающих в ремонтных мастерских, и для других нужд.

Как правило, схемы, которые прилагаются к аппаратуре для нужд технического обслуживания и ремонта в настоящее время, по сути дела представляют собой те же заводские чертежи, которые были необходимы при изготовлении и сборке данной аппаратуры. Они выполняются в строгом соответствии с требованиями междуправительственной нормы «Система чертежного хозяйства» (СЧХ), разработанной, по преимуществу, из производственных соображений. Поэтому в них нет четкой и краткой информации, необходимой для эффективного отыскания неисправностей в реальных условиях эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры. Почти все схемы и чертежи, прилагаемые к радиоаппаратуре в качестве эксплуатационной документации, не учитывают основного в настоящее время требования обслуживающего персонала — удобства ведения ремонта.

Сравнивая используемые в эксплуатации принципиальные (электрические) схемы телевизионного приемника широкого применения и типового радиолокационного приемника, нетрудно заметить, что они выполнены аналогично, хотя условия их использования совершенно различны. Если обслуживание и ремонт первого проводится специализированными мастерскими, причем коэффициент готовности имеет второстепенное значение, то второй уже из соображения необходимости постоянной готовности обслуживается и ремонтируется в основном самим обслуживающим персоналом в полевых условиях.

Инструкции по эксплуатации, схемы и чертежи, применяемые при обслуживании действующих сложных радиолокационных установок, должны отвечать следующим обязательным требованиям:

- инструкции, схемы и чертежи должны быть понятны обслуживающему персоналу, имеющему минимальную из возможных подготовку и опыт, и должны быть удобными для пользования;

- инструкции и схемы должны четко определять последовательность проверок аппаратуры;

— на схемах и чертежах должны быть четко обозначены главные и второстепенные контрольные точки, а также изображены те формы сигналов, которые ожидаются в этих точках.

Разработанные надлежащим образом инструкции по техническому обслуживанию и соответствующие им схемы и чертежи могут удовлетворить нужды обслуживающего персонала по ремонту.

Что нужно требовать от инструкций по эксплуатации для того, чтобы они способствовали улучшению ремонтпригодности в полевых условиях эксплуатируемой аппаратуры? Во-первых, такая эксплуатационная документация должна строго отвечать перечисленным выше требованиям. Во-вторых, в каждом конкретном случае должна быть рассмотрена возможность максимального упрощения работы с принципиальной схемой. В электрических схемах желательно указывать не только точки измерений, но и дополнительные сведения о характере режимов и виде сигналов, на которые техник должен обращать внимание в этих точках. Желательно иметь поэлементное представление блоков или устройств с соответствующей маркировкой и схемными соединениями. Это намного облегчает освоение техником обслуживаемой аппаратуры, значительно упрощает отыскание и устранение отказавшего элемента.

Для разработки таких схем необходимо иметь следующие сведения, относящиеся к ремонту как на этапе конструирования, так и этапе производства:

- тип радиоэлектронных цепей;
- принцип компоновки или размещения;
- задачи ремонта;
- контрольно-измерительная аппаратура;
- методика и порядок устранения неисправностей;
- квалификация обслуживающего персонала;
- условия проведения ремонта.

Эти сведения являются необходимой основой для принятия тех или иных решений при разработке и контроле инструкций по эксплуатации, а также эксплуатационных схем и чертежей. На основе изучения этих сведений можно выбрать тот или иной тип схемы, наиболее ее приемлемый формат, метод изложения информации и размер, наиболее подходящий для имеющихся условий ремонта.

Инструкцию по техническому обслуживанию, схемы и чертежи следует отрабатывать таким образом, чтобы они позволяли в кратчайшие сроки осваивать обслуживающему персоналу эксплуатируемую аппаратуру. В техническом описании понятным и ясным для обслуживающего персонала языком должны быть изложены состав, назначение, принцип построения, функциональная и электрическая схемы аппаратуры, а инструкция по техническому обслуживанию должна иметь разделы, содержащие рекомендации удобных и рациональных методов использования органов настройки и регулировки при профилактическом и текущем ремонтах.

Если операции по контролю функционирования для каждой конкретной системы заранее известны и определены, то в инструкции по техническому обслуживанию они должны быть изложены как можно более ясно и кратко с сообщением оператору оптимального порядка и способов проверок и операций. В отдельных случаях время, затрачиваемое на контроль функционирования, играет решающую роль для выполнения аппаратурой своего назначения. В условиях производства при контроле функционирования уже законченных систем можно с достаточной для эксплуатации точностью оптимизировать контрольные операции по функционированию и профилактическим ремонтам.

Инструкция по техническому обслуживанию должна обязательно включать в себя раздел, содержащий информацию по возможным неисправностям и отказам, а также по методам их отыскания и устранения. Если операции по функциональному контролю и регламентным работам могут быть изложены достаточно конкретно и сжато, то информация, содержащаяся в инструкции по отказам и неисправностям, должна регулярно пополняться и контролироваться на основании результатов настройки, приемо-сдаточных и периодических испытаний в условиях производства, а также по рекламациям потребителя. Для каждой конкретной аппаратуры или ее составных частей в инструкции могут быть предложены оптимальные методы отыскания характерных неисправностей. Для отыскания неисправных элементов применяют в основном два следующих метода:

— поочередную проверку элементов с целью последовательного отбора неисправных элементов;

— последовательное разбиение всего множества элементов на две части с целью выявления единственного неисправного элемента, так называемый «информационный метод».

## § 5. ЗИП И РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ

Для эффективной эксплуатации современной сложной радиоэлектронной системы необходима не только соответствующая техника обслуживания и квалифицированный технический персонал, но и правильно подобранное запасное имущество и принадлежности (ЗИП). Без наличия достаточного количества запасных частей правильно выбранного типа, находящихся в необходимый момент времени в нужном месте, нельзя полностью использовать ту высокую степень ремонтопригодности аппаратуры, которая обеспечивается другими факторами. Рассмотрим пример, иллюстрирующий высказанное положение.

Радиоэлектронная установка, сконструированная на основе сменных элементов и блоков, эксплуатируется в полевых условиях. Конструкция блоков и узлов, контрольно-измерительная аппаратура, инструкция по техническому обслуживанию и обслуживающий технический персонал обеспечивают минимальное время на отыскание возникающих неисправностей и отказов. Место расположения ЗИП и его полнота при оптимальном выполнении вышеперечисленных условий могут привести к двум основным ситуациям, которые в конечном итоге снижают эксплуатационную надежность всей системы, а иногда приводят к срыву решаемых ею ответственных задач. Первая ситуация — это, когда для устранения возникшей неисправности в ЗИП имеется необходимая деталь или блок, но его нет под рукой оператора. Необходимо принести или привезти нужную запасную часть, что ведет к увеличению времени восстановления аппаратуры и, следовательно, уменьшает коэффициент готовности. Вторая ситуация — отказавшую деталь или блок заменить ничем, поскольку они не были предусмотрены своевременно заводом-изготовителем. Это может привести к срыву решаемых задач.

Следовательно, разработчик и изготовитель при определении ЗИП для вновь изготавливаемой радиоап-

аппаратуры многократного действия должны решать две задачи:

- разместить придаваемый к системе ЗИП так, чтобы время, затрачиваемое на его нахождение, было минимальным;

- подобрать закладываемые в ЗИП элементы и блоки так, чтобы их полностью хватало на весь гарантированный срок службы, но одновременно не приводило к излишнему удороживанию ЗИП за счет неиспользуемых запасных частей.

Решение первой задачи требует как от разработчика, так и изготовителя хорошего знания условий эксплуатации данного вида аппаратуры, точного определения режимов работы отдельных элементов и блоков, их надежность. Если отдельные элементы или весь блок имеют высокую интенсивность отказов, то их ЗИП следует размещать в непосредственной близости от места установки в аппаратуре, в специально предусмотренных ящиках или шкафах. Блоки в шкафах ЗИП должны надежно закрепляться; должна исключаться возможность их повреждения. Элементы и детали, раскладываемые в ящики шкафов ЗИП, должны удобно и быстро выниматься, причем помимо соответствующих ведомостей с указанием их места укладки и количества, на ящиках и шкафах желательно предусматривать этикетки. Это облегчает отыскание необходимого запасного элемента и сокращает время на ремонт. ЗИП, которым пользуются не часто или при отдельных видах профилактического ремонта (квартальные или сезонные регламентные работы), следует располагать в специальных подсобных помещениях или ремонтных мастерских (базах). Отсюда, исходя из деления ЗИП по размещению, его иногда так и называют аварийный ЗИП и базовый ЗИП [22].

# ЦЕНА НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

### § 1. НАДЕЖНОСТЬ И ОЦЕНКА ОТКАЗА

Необходимость мероприятий, направленных на повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры, видна из сопоставления надежности и стоимости отказов ненадежной аппаратуры. На протяжении многих лет при проектировании радиоаппаратуры не раз принимались неправильные решения и только потому, что легко было видеть, во что обойдется надежность, тогда как достигаемая благодаря ей экономия никогда не была очевидной. Промышленность выпускала малонадежную аппаратуру, так как изготовитель прежде всего интересовался экономической стороной процесса изготовления, а сбережения, накапливаемые благодаря обеспечению высокой эксплуатационной надежности, интересовали немногих [24].

В настоящее время в действие вступил другой фактор. В современных сложных системах один случай выхода из строя имеет значительно более тяжелые последствия, чем жалобы потребителя. В частности, в космической технике и радиоэлектронике специального назначения могут встречаться случаи, когда отказ дешевой детали обойдется в миллионы рублей. Это означает, что оценивать надежность сложных радиоэлектронных систем следует на основе сопоставления надежности и стоимости отказа аппаратуры.

Стоимость отказов аппаратуры обуславливается не только потерями рабочего времени на ремонт и стоимостью деталей, но и необходимостью дублирования (резервирования) отдельных элементов или системы в целом для выполнения заданных функций, увеличением объема работ по уходу за аппаратурой, необходимостью иметь большое число запасных комплектов и деталей (ЗИП) и др.

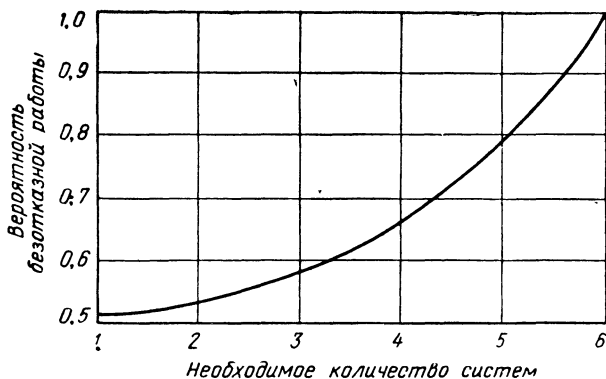


Рис. 5.1. Резерв, необходимый для обеспечения вероятности безотказной работы не менее 0,95.

Наиболее очевидной расплатой за ненадежность аппаратуры является либо полное ее разрушение или преждевременный износ, либо потеря рабочего времени на ремонт. Эта цена в действительности значительно выше, чем может показаться на первый взгляд. На примере наземной радиолокационной системы управления летательными аппаратами, описанной в работе [21], допустим, что заказывающая организация потребовала, чтобы данная система обеспечивала вероятность безотказной работы на уровне 95%. Предположим, что в процессе производства удалось достичь вероятности всего 50%. Оценим, во что обходится эта неудача разработки и производства для достижения поставленной цели.

Ввиду того, что мы не получили безотказность системы с 95%-ной вероятностью, приходится вводить дублирующие системы с тем, чтобы компенсировать недостатки производства и разработки. Из рис. 5.1 можно

видеть, что в этом случае для компенсации требуется пять дополнительных систем.

Данная кривая представляет собой значение избыточности (резерва) аппаратуры, необходимой для достижения требуемой надежности, если полученная вероятность безотказной работы меньше 95%. Она подчеркивает возросшую стоимость обеспечения заданных требований с помощью малонадежного оборудования. Аналогичные рассуждения справедливы по отношению к любому сложному радиоэлектронному оборудованию, например, заводу-автомату, к которому предъявляются такие же высокие требования в отношении надежности.

Таким образом, стоимость отказа определяет не только число отказов, но и резерв, необходимый для успешного выполнения работы.

Однако стоимость резервированной аппаратуры помимо собственной стоимости включает и вопросы, связанные с техническим обслуживанием. Вернемся к примеру с пятью ненадежными системами, ненадежность каждой из которых равна 0,5. Кривая рис. 5.1 иллюстрирует увеличение отказов при уменьшении безотказности ниже 0,95. Она получена из среднего времени между отказами, вычисленного для различных значений надежности.

Средний промежуток времени между соседними отказами в системе, имеющей вероятность безотказной работы 95%, в 14 раз больше, чем в системе с 50%-ной вероятностью, т. е. система с 50%-ной вероятностью безотказной работы должна ремонтироваться 14 раз в течение межремонтного срока для аппаратуры с 95%-ной вероятностью. При наличии же пяти таких систем проблема текущего и профилактического ремонтов усложняется по сравнению с одной надежной системой в 70 раз.

Стоимость резервированной системы продолжает катастрофически возрастать, если учесть, что для замены ремонтируемых систем нужны запасные системы, что все системы должны быть снабжены большим количеством запасных деталей, а на складах должно храниться еще большее их количество, чтобы своевременно обеспечивать поступление ЗИП в систему. Из приведенного примера видно, что недостаточное внимание к вопросам обеспечения надежности в процессе разработки



и производства может привести к тому, что стоимость эксплуатации сложных радиоэлектронных систем в десятки раз превзойдет затраты, связанные с проектированием и изготовлением.

Любая мера, направленная на обеспечение надежности, будь то понижение интенсивности отказов за счет более качественного выходного или входного контроля комплектующих деталей и элементов, усовершенствование технологии сборки и монтажа изделий или улучшение ремонтпригодности, влечет за собой увеличение стоимости как разработки, так и изготовления. Однако всегда нужно твердо помнить и понимать, что стоимость обеспечения требуемой надежности в значительной мере компенсируется достигаемой экономией при эксплуатации. Не надо бояться затратить дополнительные средства в процессе проектирования и производства, если они действительно приводят к повышению безотказности, долговечности и ремонтпригодности изделия. Низкая стоимость эксплуатации будет достойным результатом израсходованных сил и средств.

Рассмотрим отдельные мероприятия, направленные на обеспечение высокого уровня надежности современного сложного радиоэлектронного оборудования. Например, разрабатывается и изготавливается высоконадежное цифровое счетно-решающее устройство, являющееся частью системы управления космическими объектами [22]. Это счетно-решающее устройство, при разработке которого надежность рассматривалась как первоочередная цель, содержит около 10 000 транзисторов, 30 000 полупроводниковых диодов, 40 000 резисторов и большое количество других деталей — всего свыше 100 000 деталей. В договоре на разработку эксплуатационная надежность данной системы была оговорена как определенная вероятность успешной работы в течение заданного промежутка времени.

Поскольку был оговорен предел надежности, то это привело к необходимости планомерного подхода к обеспечению требуемой эксплуатационной надежности конечной продукции. На основании требуемого среднего времени между отказами ( $T_{cp}=60$  час) были установлены требования в отношении надежности для каждой группы комплектующих деталей. При сравнении этих требований с характеристиками существующих деталей

стало очевидно, что для достижения наибольшей надежности необходимо разрабатывать новые детали, либо отбирать из выпускаемых промышленностью элементы с удовлетворяющими разработку параметрами. В данном случае время не позволяло разрабатывать новые детали, поэтому для повышения надежности системы единственным практическим средством было задать такие требования в ТУ на комплектующие элементы, в которых бы оговаривался специальный отбор деталей и испытания. Эти жесткие технические условия неизбежно привели к повышению стоимости изделия. Однако во многих случаях такие требования, повышающие, с одной стороны, стоимость специально введенного отбора существующих деталей на выходном контроле, с другой стороны, приводят к исключению потенциальных (скрытых) отказов. По мере приобретения опыта в таком отборе, усовершенствования методов процесса отбора, позволяющих точно разделять детали с потенциальными дефектами и надежные детали, становится бесспорным, что такой отбор даст при эксплуатации действительную экономию средств, исключая неполадки до их возникновения.

Другое мероприятие, направленное на повышение эксплуатационной надежности и, как кажется на первый взгляд, приводящее к необоснованному удорожанию изделия, мы рассмотрим на этом же примере, но только на этапе разработки. Этот момент необходимо подчеркнуть, так как никакая система не будет надежной, если она базируется на неправильной основе. При разработке счетно-решающего устройства можно было бы сосредоточить максимум усилий разработчиков на небольшом числе цепей, поскольку счетно-решающие устройства обычно представляют собой систему с небольшим числом основных для данной машины цепей, многократно повторяющихся, либо распылить силы разработчиков поровну на ответственные и неответственные цепи.

В данном счетно-решающем устройстве одна схема — усилитель на транзисторах с кристаллическими диодами в качестве логических элементов — повторялась в 75% всех цепей устройства. Для обеспечения ее работы достаточно одного транзистора, нескольких диодов и 4—5 резисторов, но работа должна быть надежной, так

9—2521

как на ней основана надежность всей системы. Поэтому для анализа и усовершенствования этой элементарной схемы была выделена группа из двух инженеров и одного математика. Эти три специалиста вместе с техническими помощниками затратили три месяца на уточнение и отбраковку схемы, обеспечивающей наиболее надежную работу. При этом они пользовались вычислительной машиной, с помощью которой произвели расчет и оценку характеристик для 3 000 вариантов схемы. По полученным данным была выбрана схема, выдерживающая максимально допустимые отклонения параметров комплектующих элементов от номинала. Оправданием затраченного труда и средств явилась устойчивая работа схемы, которая надежно функционирует даже в том случае, когда номинал любой детали отклоняется от предела, установленного техническими условиями, на максимальную величину, которая только возможна в условиях эксплуатации.

Если разработка сложных радиоэлектронных систем будет строиться подобным же образом, в сочетании с затратами равных усилий в процессе производства, то можно ожидать получения надежной аппаратуры.

## § 2. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Требования к надежности любой радиоэлектронной аппаратуры всегда находятся в противоречии с требованиями, предъявляемыми к ее стоимости. Действительно, из рассмотренного выше примера, видно, что, чем больше затрачивается средств на повышение надежности в процессе разработки и производства аппаратуры, тем более высокой надежности следует от нее ожидать. Одновременно можно считать, что с повышением надежности радиоаппаратуры многократного действия эксплуатационные затраты будут снижаться.

Поскольку повышение надежности связано с затратами, то для достижения высокой надежности эти затраты могут оказаться настолько большими, что дальнейшее повышение становится экономически неоправданным. В таких случаях следует искать оптимальное решение. Не случайно поэтому за последнее время в ли-

температуре все чаще начинает упоминаться понятие оптимальной надежности [27].

Под оптимальной надежностью понимают такое значение параметров надежности радиоэлектронной аппаратуры, в течение заданного срока и при определенных условиях эксплуатации, при которых все затраты, связанные с ее разработкой, производством и эксплуатацией, будут наименьшими. Полная стоимость разработки, производства и эксплуатации современных сложных радиоэлектронных систем выражается в виде суммы

$$C = C_p + C_{\pi} + C_{\varepsilon},$$

где  $C_p$  — затраты на разработку аппаратуры;

$C_{\pi}$  — затраты на производство аппаратуры;

$C_{\varepsilon}$  — затраты, связанные с эксплуатацией аппаратуры.

Зависимость полной стоимости, представленная на рис. 5.2, от вероятности безотказной работы (эксплуатационной надежности) имеет минимум при некоторой

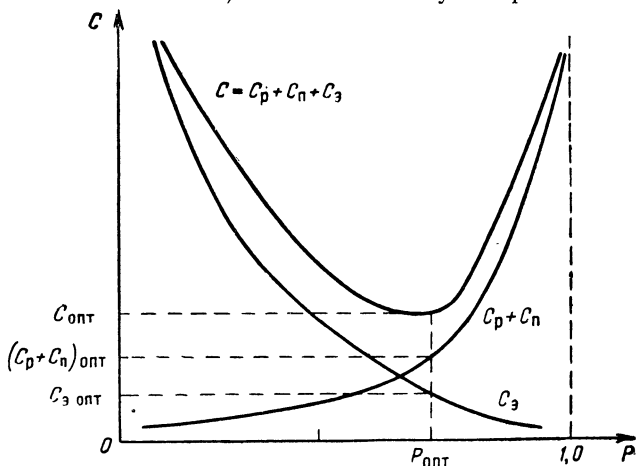


Рис. 5.2. Зависимость стоимости затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию систем от эксплуатационной надежности.

надежности, являющейся оптимальной с экономической точки зрения. Вполне естественно, что такой подход возможен лишь в системах, которые не связаны с жизнью и безопасностью использующих их людей. В противном

случае любые затраты для достижения требуемой надежности будут оправданы.

Экономические проблемы надежности в настоящее время еще мало изучены. Для того чтобы получить цифры, на которые можно было бы полагаться при оценке стоимости разработки и производства, в зависимости от надежности работы аппаратуры, необходимо

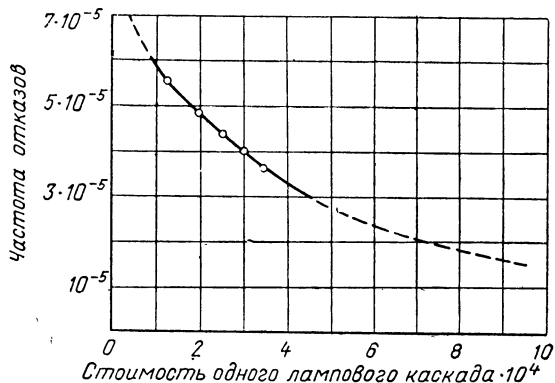


Рис. 5.3. Стоимость разработки в зависимости от частоты отказов (для одного лампового каскада).

иметь большое количество статистических данных относительно эксплуатационной надежности рассматриваемого оборудования. Для этого аппаратура должна быть испытана в работе в течение довольно продолжительного времени, т. е. речь может идти об аппаратуре, которая была разработана не менее 5—6 лет тому назад.

Для ориентировочной оценки стоимости разработки сложных систем многократного действия воспользуемся данными, собранными для некоторых видов типовой наземной радиоэлектронной аппаратуры, сложность, стоимость и надежность которой известны или могут быть определены по спецификациям [26].

Эти данные были пересчитаны в стоимость разработки в зависимости от требуемой надежности на каждый ламповый каскад, поскольку радиолампа являлась самым ненадежным элементом радиоаппаратуры. Таким образом, был построен график, приведенный на рис. 5.3, для среднего количества и типа деталей, используемых в каждом ламповом каскаде, известной средней вели-

чины интенсивности отказов и кривых зависимости между режимами деталей и частотой отказов.

Пользоваться таким графиком можно следующим образом. При расчете определяют число вакуумных ламп, используемых в разрабатываемой аппаратуре, а затем находят среднюю интенсивность отказов на каждый ламповый каскад по формуле

$$\lambda = \frac{\ln\left(\frac{1}{P}\right)}{N_{\text{в}} \cdot \Delta t} = \frac{1}{N_{\text{в}} \cdot T_{\text{ср}}},$$

где  $P$  — вероятность безотказной работы схемы в течение заданного периода времени  $\Delta t$ ;

$N_{\text{в}}$  — общее количество применяемых вакуумных ламп;

$T_{\text{ср}}$  — среднее время между отказами или наработка на отказ.

Далее, пользуясь кривой рис. 5.3, определяют затраты на каждый ламповый каскад, необходимые для получения требуемой величины  $\lambda$ , а также общую стоимость аппаратуры путем умножения на  $N_{\text{в}}$ .

Очевидно, что масштаб графика рис. 5.3 и использование многих переменных ограничивают его точность и требуют конкретизации в каждом отдельном случае, однако имеется настоятельная необходимость в наличии какого-либо, хотя бы приближенного, но быстрого метода оценки стоимости разработки, в зависимости от показателей надежности, и график рис. 5.3 как раз представляет такую возможность. Кривая рис. 5.3 была построена по данным для аппаратуры, которая разрабатывалась без применения специальных мер по повышению эксплуатационной надежности. Для аппаратуры, в которой детали должны работать в более жестком режиме (высокий коэффициент нагрузки), можно добиться повышения эксплуатационной надежности изделия ценой не очень больших дополнительных затрат на разработку. Например, среднее время работы между отказами УКВ приемо-передатчика было увеличено с 500 до 1500 час за счет незначительной модификации конструкции, позволяющей устранить избыточную тепловую нагрузку некоторых ламп [25].

Известно, что в разрабатываемой в настоящее время радиоэлектронной аппаратуре используется большое

число полупроводниковых элементов. Естественно возникает вопрос, каким образом можно оценить стоимость разработки аппаратуры с требуемой надежностью в случае, если эта аппаратура частично или полностью выполнена на транзисторах. В настоящее время имеется еще очень мало фактических данных, на основании которых можно было бы сделать такую оценку.

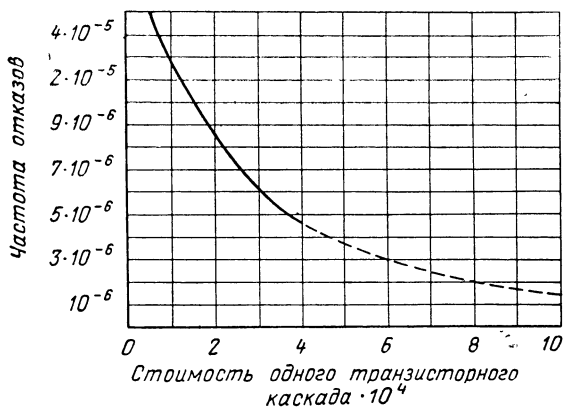


Рис. 5.4. Расчетная стоимость разработки в зависимости от частоты отказов для одного транзисторного каскада.

Однако, допуская, что:

- средняя цена транзисторов и вакуумной лампы одинакова;

- на схему одинакового назначения приходится равное количество вакуумных ламп, транзисторов и других типов деталей;

- стоимость конструирования ламповых и транзисторных схем при разработке аппаратуры одинакова;

- средняя частота отказов транзистора составляет 1/15 от средней частоты отказов лампы;

- транзисторный каскад в среднем имеет меньшую частоту отказов (примерно в три раза), чем ламповый каскад;

была построена кривая рис. 5.4, которая не является идеальной, но может быть полезной при оценке затрат на разработку надежных транзисторных схем [26].

Оценка необходимых затрат в инженерной практике для аппаратуры, в которой используются как транзисторы, так и электровакуумные лампы, может производиться следующим образом:

— определяется полное количество ламп и полное количество транзисторов, которое будет использовано в аппаратуре;

— если требуемая надежность аппаратуры выражена как среднее время между отказами ( $T_{cp}$ ), то эта величина преобразуется в интенсивность отказов ( $\lambda_a = 1/T_{cp}$ );

— требуемая надежность распределяется между оцениваемыми типовыми ламповыми и транзисторными каскадами таким образом, чтобы соблюдалось соотношение

$$\lambda_a = \lambda N_b + \frac{\lambda}{3} N_t,$$

где  $\lambda_a$  — интенсивность отказов аппаратуры;

$\lambda$  — средняя интенсивность отказов одного лампового каскада;

$N_b$  — число оцениваемых вакуумных ламп;

$N_t$  — число оцениваемых транзисторов;

— полученное уравнение решается относительно  $\lambda$ , и с помощью кривой рис. 5.3 определяется средняя стоимость требуемой надежности каждого лампового каскада ( $C_b$ );

— определяется частота отказов для транзисторного каскада  $\lambda/3$  и с помощью кривой рис. 5.4 находится средняя стоимость требуемой надежности для одного транзисторного каскада ( $C_t$ );

— находится полная стоимость разработки в зависимости от надежности аппаратуры как сумма  $C_p = C_b N_b + C_t N_t$ .

Расходы, связанные с проверкой надежности, здесь не учитывались.

Дополнительные затраты производства, необходимые для реализации требуемой надежности, предусмотренной в процессе разработки аппаратуры, обусловлены, в основном, покупкой и проверкой более надежных элементов, а также испытаниями на надежность готовой продукции. На рис. 5.5 приведены кривые, иллюстрирующие зависимость между сложностью радиоэлектронной



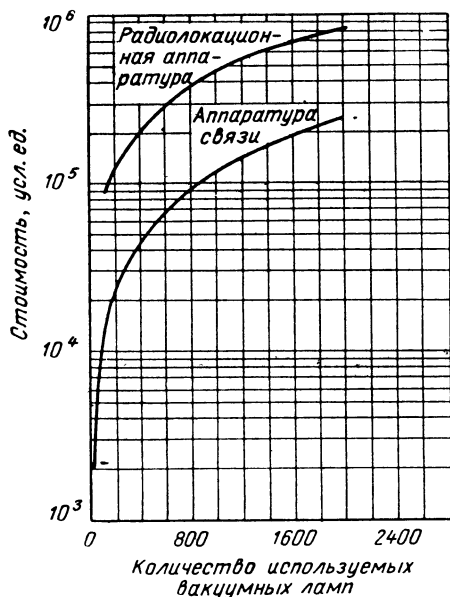


Рис. 5.5. Зависимость средней стоимости производства сложности наземной радиолокационной аппаратуры и аппаратуры связи.

аппаратуры и средней стоимостью производства для радиолокационной аппаратуры и аппаратуры связи.

Уравнение для оценки стоимости производства, отнесенной к одному законченному узлу или блоку, можно записать в виде

$$C_{\Pi} = C_0 + C_{\text{сн}} \left( \frac{T}{T_c} \right)^a,$$

где  $C_{\Pi}$  — полная стоимость производства каждого узла (блока);

$C_0$  — составляющая стоимости, независимая от надежности;

$C_{\text{сн}}$  — составляющая стоимости, при существующем уровне надежности;

$T$  — наработка на отказ, являющаяся мерой надежности изготавливаемой системы;

$T_c$  — наработка на отказ, типичная для современного уровня надежности;

$a$  — постоянная, определяемая экспериментально.

Поскольку в справочной литературе для характеристики надежности радиоэлементов обычно приводятся интенсивности отказов, формулу полной стоимости производства целесообразно преобразовать, выразив второе слагаемое через интенсивности отказов элементов:

$$C_{\Pi} = C_0 + C_{\text{сн}} \left( \frac{\sum_{i=1}^m n_i \lambda_{\text{сн}i}}{\sum_{i=1}^m n_i \lambda_i} \right)^a,$$

где  $m$  — количество типов элементов в узле;

$\lambda_{\text{сн}i}$  — интенсивность отказов элементов  $i$ -го типа при существующем уровне надежности;

$\lambda_i$  — интенсивность отказов элементов  $i$ -го типа повышенной надежности;

$n_i$  — количество элементов  $i$ -го типа.

Для полной оценки стоимости обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры необходимо учесть стоимость обслуживания в период эксплуатации, так как затраты на обеспечение высокой надежности при разработке и производстве могут частично и иногда даже полностью окупаться за счет снижения стоимости технического обслуживания надежной аппаратуры по сравнению с ненадежной.

Общая формула для определения эксплуатационных расходов имеет следующий вид:

$$C_{\text{э}} = C_{\text{рем}} + C_{\text{пот}},$$

где  $C_{\text{рем}}$  — стоимость ремонта;

$C_{\text{пот}}$  — экономические потери, связанные с простоем аппаратуры.

Минимально возможные затраты на эксплуатацию изделия естественно будут соответствовать стоимости одного ремонта и расходам, связанным с простоем аппаратуры в течение времени одного ремонта. Тогда эксплуатационные расходы можно определить из выражения

$$C_{\text{э}} = n(C_{\text{р}} + C'_{\text{пот}}) = nC_{\Sigma},$$

где  $n$  — количество ремонтов;

$C_p$  — стоимость одного ремонта;

$C'_{\text{пот}}$  — стоимость потерь, вызванных простоем аппаратуры за время, соответствующее продолжительности одного ремонта;

$C_{\Sigma}$  — суммарные эксплуатационные затраты, связанные с одним ремонтом аппаратуры.

Исходя из предположения, что наземная радиоэлектронная аппаратура имеет средний срок службы 5 лет,

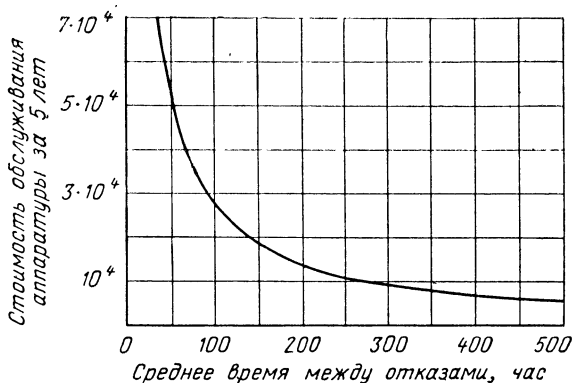


Рис. 5.6. Экономия расходов на обслуживание за счет повышения эксплуатационной надежности.

была получена кривая рис. 5.6, иллюстрирующая зависимость между стоимостью средств, идущих на обслуживание аппаратуры, и повышением эксплуатационной надежности. Другими словами, эта кривая показывает, какая достигается экономия средств, расходуемых на обслуживание одного блока в течение 5 лет, при повышении эксплуатационной надежности на некоторую величину.

Такой график оказывается весьма полезен при планировании. Например, был сделан анализ УКВ приемопередающих устройств, имеющих примерно 100 ламп и наработку на отказ 300 час. Всего было исследовано 3000 таких устройств. С помощью графика рис. 5.6 было установлено, что общая экономия расходов на обслуживание за 5 лет при повышении  $T_{\text{ср}}$  от 300 до 400 час составляет  $7,5 \cdot 10^6$  долл. Из рис. 5.3 следует, что эта

цифра в 5 раз превышает дополнительные расходы при разработке, связанные с повышением надежности. Следовательно, 20% средств, сэкономленных на обслуживании, покрывают все расходы при разработке, требуемые для повышения эксплуатационной надежности [26].

Приведенный метод является весьма приближенным за отсутствием надлежащих данных при оценке всех трех составляющих стоимости надежности, а именно: расходов на разработку, на производство и обслуживание аппаратуры. Однако можно надеяться, что этот метод окажется полезным для практических оценок. Очевидно, что со временем по мере накопления данных такой метод оценки будет уточняться.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ТЕРМИНОЛОГИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Термин	Определение термина
Нормальные климатические условия	<p>Условия окружающей среды, характеризующиеся:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>а) температурой <math>+ 20 \pm 5^{\circ}\text{C}</math>;</li> <li>б) относительной влажностью <math>65 \pm 15\%</math></li> <li>в) атмосферным давлением <math>750 \pm \pm 30 \text{ мм рт. ст.}</math></li> </ul>
Предельные климатические условия	<p>Под предельными климатическими условиями понимаются крайние значения температуры, давления и относительной влажности окружающего воздуха, в которых аппаратура может находиться при транспортировке и хранении. Параметры аппаратуры после длительного (2—10 суток) воздействия этих условий должны удовлетворять нормам ТУ</p>
Рабочие климатические условия	<p>Допустимые значения температуры, давления и влажности окружающего воздуха, при которых аппаратура должна сохранять свою работоспособность в течение срока эксплуатации</p>
Работоспособность	<p>Свойство аппаратуры выполнять заданные функции в соответствии с требованиями ТУ</p>
Установившийся тепловой режим аппаратуры	<p>Для аппаратуры непрерывного действия тепловой режим, при котором изменение температуры ее элементов не превышает <math>\pm 1^{\circ}\text{C}</math> в течение 15 мин при неизменном режиме работы и неизменной температуре окружающей среды</p>
Повышенная влажность	<p>Относительная влажность выше 80%</p>
Пониженное давление	<p>Давление воздуха ниже 720 мм рт. ст.</p>
Теплоустойчивость	<p>Свойство аппаратуры сохранять свою работоспособность при повышенной температуре окружающей среды</p>
Холодоустойчивость	<p>Свойство аппаратуры сохранять свою работоспособность при пониженной температуре окружающей среды</p>

Термин	Определение термина
Благоустойчивость	Свойство аппаратуры сохранять работоспособность в среде с повышенной относительной влажностью
Брызгозащищенность	Свойство аппаратуры сохранять работоспособность во время пребывания в брызгонесущей среде
Водозащищенность	Свойство аппаратуры сохранять свою работоспособность после пребывания в воде
Герметичность	Свойство аппаратуры не допускать проникновения воды внутрь корпуса при длительном воздействии гидравлического давления
Высотность	Свойство аппаратуры сохранять работоспособность в условиях эксплуатации при пониженном атмосферном давлении
Пылезащищенность	Свойство аппаратуры не допускать попадания внутрь корпусов пыли при пребывании в среде с повышенной концентрацией пыли
Виброустойчивость	Свойство аппаратуры выполнять свои функции в условиях вибрации в заданных диапазонах частот и ускорений
Вибропрочность	Свойство аппаратуры противостоять разрушающему действию вибрации в заданных диапазонах частот и ускорений и продолжать после воздействия вибрации выполнять свои функции
Ударная прочность	Свойство аппаратуры противостоять разрушающему действию ударов заданной величины и продолжать после их воздействия выполнять свои функции
Взрывное воздействие	Непосредственное воздействие на аппаратуру взрывной волны или ударное сотрясение аппаратуры при взрыве через несущие конструкции
Коэффициент амортизации	Отношение амплитуды возбуждающих колебаний к амплитуде колебаний амортизированной аппаратуры на заданной частоте
Ветроустойчивость	Свойство (антенных) сооружений противостоять разрушающему действию механических нагрузок, вызванных ветром заданной скорости, и выполнять свои функции в условиях действия ветра

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. Изд-во «Наука», 1965.
2. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. Изд-во «Советское радио», 1962.
3. Дружинин Г. В. Надежность устройств автоматики. Изд-во «Энергия», 1964.
4. Ллойд Д., Липов М. Надежность. Организация использования, методы, математический аппарат. Изд-во «Советское радио», 1964.
5. Памятка по вопросам надежности промышленных изделий. Под ред. Я. Б. Шора. Изд-во «Знание», 1965.
6. Как можно добиться высокой надежности сложной военной радиоэлектронной аппаратуры. IRE Trans., 1960, RQC-9, v. PGRQC-16, IV.
7. Обеспечение надежности радиоэлектронной аппаратуры в процессе ее изготовления. Proc. 9 Nat. Sympos. Reliability and Qual. Control, 1963.
8. Гусев В. П., Фомин А. В. и др. Расчет электрических допусков радиоэлектронной аппаратуры. Изд-во «Советское радио», 1963.
9. Хинней К., Уолш К. Радиодетали и проблема их надежности. Изд-во «Советское радио», 1960.
10. Буклер В. О., Казаринов Ю. М., Рабинович Ю. И., Ангелевич Н. Э. Регулировка радиоаппаратуры. Изд-во «Энергия», 1964.
11. Браудо С. И. Сохранение надежности радиолокационной аппаратуры. Настройка, контроль параметров, предупреждение и диагностика отказов. Изд-во «Советское радио», 1965.
12. Улинич Р. Б. Измерительная аппаратура и надежность изделий. «Стандартизация», 1965, № 11.
13. Буяновский Г. Надежность и входной контроль. «Техника и вооружение», 1962, № 11.
14. Астафьев А. В. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. Изд-во «Энергия», 1965.
15. Малинский В. Д., Ошер Д. Н., Теплицкий Л. Я. Испытания радиоаппаратуры. Изд-во «Энергия», 1965.
16. Коуден Д. Статистические методы контроля качества. Пер. с англ., под ред. Б. Р. Левина. Физматгиз, 1961.
17. Надежность полупроводниковых устройств. Пер. с англ., под ред. А. А. Маслова. Изд-во иностранной литературы, 1963.
18. Manheimer B. H. and Kelley I. R. An Overview of Human Factors in Electronic Maintenance. IRE Trans. on Human Factors in Electronics, 1961, v. HFE-2, IX, № 2.

19. Перротте А. И. О режиме оптимальной профилактики систем длительного использования. «Автоматика», 1961, № 3.

20. Ремонтопригодность радиоэлектронной аппаратуры. Пер. с англ., под ред. О. Ф. Пославского. Изд-во «Советское радио», 1964.

21. Winlind E. S. System Evaluationer Reliability in Electronic Perspective. IRE Trans. Reliability and Quality Control 2, 1962, v. RQC-11, № 1.

22. Базовский И. Надежность. Теория и практика. Пер. с англ., под ред. Б. Р. Левина. Изд-во «Мир», 1965.

23. Вишневский А. А. и др. Экономика связи. Связьиздат, 1961.

24. James L. N. St. Economics dictates reliability. IEEE Trans. Aerospace, 1964, № 2.

25. Экономическая оценка методики испытания блоков аппаратуры. IRE Trans on Instrumentation, 1960, v. 1—9, VI, № 1.

26. Во что обходится надежность? IRE Cont. Rec., 1959, pt. 6, v. 7, p. 89—97.

27. Брудник С. С., Таран В. А. Практические методы определения оптимальной надежности. «Приборостроение», 1963, № 7.

28. Улинич Р. Б. Эксплуатационная надежность изделий и контрольная аппаратура. «Стандартизация», 1965, № 12.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие редактора . . . . .</i>	3
<i>Введение . . . . .</i>	6
<b>Глава первая. Надежность и конструкция . . . . .</b>	<b>9</b>
§ 1. Надежность конструкции — общая задача проектирования и производства . . . . .	9
§ 2. Технические условия как фактор надежности . . . . .	18
§ 3. Изготовление опытного образца — контрольная проверка качества проектирования . . . . .	25
<b>Глава вторая. Надежность и технология . . . . .</b>	<b>32</b>
§ 1. Технологичность конструкции и заданная надежность . . . . .	32
§ 2. Управляемый технологический процесс производства — основа высоконадежной аппаратуры . . . . .	44
§ 3. Обеспечение надежности при настройке радиоэлектронной аппаратуры . . . . .	59
<b>Глава третья. Контроль качества — контроль надежности . . . . .</b>	<b>67</b>
§ 1. Входной контроль производства и эксплуатационная надежность . . . . .	67
§ 2. Воздействие окружающей среды. Периодические испытания . . . . .	73
§ 3. Человек и объективный контроль . . . . .	87
<b>Глава четвертая. Ремонтопригодность сложной радиоэлектронной аппаратуры и производство . . . . .</b>	<b>92</b>
§ 1. Ремонтопригодность как свойство радиоаппаратуры многократного действия . . . . .	92
§ 2. Конструкция и ремонтопригодность . . . . .	99
§ 3. Контролепригодность сложных радиоэлектронных систем . . . . .	104
§ 4. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонтопригодность . . . . .	110
§ 5. ЗИП и ремонтопригодность . . . . .	115
<b>Глава пятая. Цена надежности радиоэлектронной аппаратуры . . . . .</b>	<b>117</b>
§ 1. Надежность и оценка отказа . . . . .	117
§ 2. Экономическая эффективность обеспечения надежности . . . . .	122
<i>Приложение. Терминология периодических испытаний . . . . .</i>	<i>132</i>
<i>Литература . . . . .</i>	<i>134</i>

Цена 37 коп.

