

А. Д. КРОП

**АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ  
ЭЛЕКТРОННОЙ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ  
АППАРАТУРЫ  
ПРИ ЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

Под редакцией В. Н. Сретенского



МОСКВА «СОВЕТСКОЕ РАДИО» 1978

ББК 30.14

К83

УДК 621.3.019

Кроп А. Д. Анализ надежности электронной измерительной аппаратуры при ее проектировании / Под ред. В. Н. Сретенского.— М.: Сов. радио, 1978, 112 с., ил. — (Б-ка инженера по надежности).

Изложены основные вопросы надежности электронной измерительной аппаратуры (ЭИА) на различных этапах ее проектирования. Рассмотрены особенности проектирования этого вида аппаратуры. Приведены инженерные методы оценки надежности. Определяется роль подразделения надежности в процессе проектирования ЭИА.

Книга представляет интерес для инженерно-технических работников, связанных с вопросами надежности и проектированием электронных измерительных приборов.

Рис. 22, табл. 23, библ. 35 назв.

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Б. В. Гнеденко (отв. редактор), Б. Е. Бердичевский, В. А. Каитанов, И. Н. Коваленко, В. А. Кузнецов, А. М. Майоров, Е. Ю. Намюот, А. М. Половко, О. Ф. Пославский, А. В. Соловьев, Р. Б. Уличич, И. А. Ушаков, Н. А. Шишонок.

Редакция радиотехнической литературы.

К 30405-027  
046(01)-78 32-78

© Издательство «Советское радио», 1978 г.

## **Предисловие редактора**

Все более широкое применение электронной измерительной аппаратуры (ЭИА) в различных областях науки и техники привело к созданию и массовому выпуску обширной номенклатуры измерительных приборов общего назначения. Возникли многие новые проблемы приборостроения, обусловленные необходимостью расширения пределов измеряемых величин, обеспечения точности измерения и надежности, миниатюризации, решения эргономических задач, автоматизации, сопряжения приборов при использовании в измерительных комплексах и т. д. Решение перечисленных проблем далеко от своего завершения из-за быстрого роста требований к качеству и появления новых возможностей конструирования приборов на основе достижений современной электроники (интегральных микросхем, больших интегральных микросхем в виде микропроцессоров, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей, а также высокочастотных транзисторов, СВЧ приборов, цифровых индикаторов и т. д.).

Отмеченное свидетельствует об актуальности книги, посвященной обобщению опыта проектирования электронной измерительной аппаратуры и рассмотрению способов обеспечения ее надежности. В ней автор не ставит задачи изложения методов расчета надежности аппаратуры, детальной оценки эффективности применения новых изделий электронной техники, анализа управления качеством и надежностью в виде единой системы целенаправленного действия. Главное внимание в книге сосредоточено на общих принципах проектирования электронной измерительной аппаратуры, особенностях обеспечения ее надежности на всех этапах «жизненного цикла». Такое изложение является полезным для широкого круга специалистов — практиков, занимающихся конструированием, изготовлением, испытаниями и эксплуатацией измерительной аппаратуры.

В книге содержатся сведения о тенденциях развития некоторых видов электронной измерительной аппаратуры и данные о реальных условиях эксплуатации, обоб-

щёйные автором по результатам многолетней практики испытаний аппаратуры.

С некоторыми положениями книги и соображениями автора, по-видимому, не все будут полностью согласны, особенно это касается организационных мероприятий по изучению и обеспечению надежности аппаратуры. Думается, что сближение точек зрения автора и читателя возможно при учете особенностей аппаратуры, принятых организационных форм подразделений надежности и методов испытаний на надежность, исторически сложившихся неодинаковыми в различных отраслях промышленности.

Можно надеяться, что настоящая книга, подготовленная опытным специалистом в области измерительной техники канд. техн. наук А. Д. Кропом, окажет положительное влияние на работы по созданию надежных измерительных средств.

*В. Сретенский*

## **Введение**

Среди ключевых проблем, рассмотренных XXV съездом КПСС, большое место отведено проблеме дальнейшего повышения эффективности производства и качества продукции. Проблема повышения эффективности общественного производства решается на основе всемерного улучшения качества продукции во всех отраслях народного хозяйства, более полного использования в народном хозяйстве достижений научно-технической революции в результате создания и внедрения принципиально новых орудий труда, материалов и технологических процессов, превосходящих по своим технико-экономическим показателям лучшие отечественные и мировые достижения. В этих условиях важная роль отводится электронной измерительной технике, которая является инструментальной базой для многих отраслей науки и техники, поэтому от технического уровня и качества электронных измерительных приборов (ЭИП) зависит дальнейшее развитие таких важнейших областей науки и техники, как радиоэлектроника, связь, радиолокация, атомная физика и т. д., определяющих прогресс в развитии общества на современном этапе.

Электронные измерительные приборы, как и всякие измерительные средства, применяются для количественной оценки параметров, характеристик и процессов, происходящих в технических устройствах. Электронная измерительная аппаратура является тем видом аппаратуры, без которого невозможно изготовление и эксплуатация любой другой электронной аппаратуры.

Значение аппаратуры электронных измерений тем более очевидно, что примерно 60% времени проектирования радиоэлектронных систем занимают измерения.

Развитие техники электронных измерений, которое опирается на последние достижения радиофизики, электроники и радиотехники, должно было опережать разработку радиотехнических средств, поступающих в эксплуатацию. Это способствовало созданию целой отрасли приборостроения по проектированию и созданию ЭИП, которая быстро развивалась. Так, только за период с 1957 по 1970 гг. выпуск ЭИП увеличился не менее, чем в 4,5 раза [1].

Наряду с количественным ростом происходит и другой процесс, связанный с качественными изменениями, которые обусловлены резким возрастанием потока информации и постоянной тенденцией к повышению точности измерений. Указанные факторы приводят к усложнению приборов и тем самым прямо или косвенно влияют на эффективность их использования. Возникла проблема обеспечения надежности приборов, занимающая центральное положение в комплексной проблеме повышения качества.

Проблема надежности, сформулированная почти четверть века назад применительно к радиоэлектронным устройствам, заключается в разработке и внедрении методов создания таких изделий, которые способны выполнять заданные функции в течение требуемого промежутка времени. В более широком смысле надежность определяется [2] как «свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки».

Обеспечение надежности является одним из мощных резервов повышения эффективности общественного производства. Недостаточная надежность ЭИП вдвойне опасна, так как она приводит к потерям, связанным с ликвидацией обнаруженного отказа в самом приборе (введение в обращение резервных приборов), и, кроме

того, приводит к выпуску ненадежной аппаратуры, которую данный измерительный прибор обслуживает.

Надежностью электронной измерительной аппаратуры начали заниматься у нас и за рубежом в конце 50-х годов. За прошедшие годы благодаря усилиям многих специалистов удалось создать определенную систему, обеспечивающую разработку, внедрение в серийное производство и серийный выпуск ЭИП с заданной надежностью. Появился определенный опыт, изложенный в различных источниках, который можно и целесообразно обобщить. Работа по оценке и обеспечению надежности ЭИП должна быть связана с системой работ по проектированию приборов, так как эти процессы составляют единое целое.

Процессу проектирования ЭИП присуща некоторая специфика. Основной задачей этого процесса является разработка полного комплекта конструкторской документации, изготовление и испытание опытного образца, соответствующего утвержденному заданию. Основными этапами процесса проектирования ЭИА являются:

- подготовительная стадия — составление технического задания;
- эскизный проект;
- технический проект;
- разработка рабочей документации опытного образца и создание самого опытного образца.

Рассмотрим, какие задачи решаются на указанных этапах.

1. Подготовительный этап — составление технического задания. Главной задачей данного этапа является выявление основных требований к проектируемому прибору, оценка предполагаемой экономической эффективности при его внедрении в эксплуатацию и в соответствии с этим определение заинтересованности в приборе различных потребителей и конкурентоспособности его на мировом рынке. Кроме того, на этом этапе определяются принципиальные пути и возможности решения задачи, поставленной перед разработчиком, а также уточняется общий объем теоретических и экспериментальных работ, подлежащих исполнению.

На подготовительной стадии составляют основной документ: — техническое задание (ТЗ), в котором указывают требования к техническим параметрам прибора

его конструктивным характеристикам, надежности, долговечности, сохраняемости и т. д.

Основное внимание обращают на определение метрологических характеристик, обеспечивающих требуемую погрешность измерения.

Подготовительный этап включает также рассмотрение патентного обзора, составление экономического обоснования с расчетом экономического эффекта, перечня возможных новых технологических процессов и справок о метрологическом обеспечении.

Указанные материалы рассматриваются совещательным органом технического руководства предприятия-разработчика, который решает вопрос о степени подготовленности к данной работе, о возможности ее включения в государственный план и заключения соответствующих договоров.

2. Эскизный проект. Эскизным проектом называется совокупность конструкторских документов, содержащая схемы и конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, и данные, определяющие его назначение, основные параметры и габаритные размеры.

Основные задачи, которые решаются на этапе эскизного проекта, состоят в следующем:

- выбор лучших вариантов построения прибора и его отдельных узлов в соответствии с ТЗ;
- уточнение значений основных технических параметров, заданных ТЗ;
- проработка и уточнение технико-экономических характеристик, связанных со стоимостью разработки и предполагаемой ценой прибора;
- определение основных конструктивных и технологических решений прибора, вопросов сопряжения отдельных, составных частей, а также номенклатуры материалов и полуфабрикатов;
- выбор и уточнение элементной базы, которая может быть использована в приборе;
- макетирование основных узлов приборов в объеме, необходимом для оценки правильности и выполнимости решений в соответствии с ТЗ;
- решение вопросов метрологического обеспечения производства и эксплуатации, определение номенклатуры нестандартной контрольно-измерительной и регулировочной аппаратуры и разработка ТЗ на их конструктирование;

- проработка вопросов математического обеспечения (для измерительных систем, работающих с ЭВМ);
- оценка надежности прибора в соответствии с выбранным вариантом его построения;
- разработка мероприятий по защите прибора от всевозможных внешних воздействий.

3. Технический проект. Техническим проектом называется совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого прибора и исходные данные для разработки рабочей конструкторской документации на опытные образцы. Технический проект служит основой для выполнения следующей стадии — изготовления опытных образцов.

Основной целью технического проектирования является теоретическая и экспериментальная проверка схемных, конструктивных и технологических решений разрабатываемого прибора.

В процессе разработки технического проекта создается уточненная электрическая принципиальная схема прибора, осуществляется проверка новых материалов и комплектующих изделий, уточняются режимы их работы, создается макет прибора по упрощенной технической документации и производятся измерения выходных параметров и других необходимых величин. Созданные макеты прибора подвергаются всесторонним лабораторным испытаниям. Особое внимание уделяется испытаниям вновь спроектированных узлов, а также испытаниям на устойчивость при различных значениях действующих факторов.

Оцениваются технологичность разрабатываемого прибора, соответствие применяемых элементов уровню и требованиям комплексной микроминиатюризации. Проверяется степень унификации изделий.

На стадии технического проектирования решаются вопросы освоения и внедрения новых технологических процессов, необходимых для разработки прибора. При этом макет прибора изготавливают, применяя осваиваемые процессы. Решаются также вопросы метрологического обеспечения выпуска и эксплуатации прибора, определяются рациональные межпроверочные интервалы, которыми руководствуется потребитель в эксплуатации.

Особое внимание уделяется вопросам обеспечения высокой серийноспособности, для чего предусматрива-

ются мероприятия по снижению трудоёмкости изготавления и настройки, улучшению взаимозаменяемости элементов и узлов, применению техпроцессов, не требующих дорогостоящего оборудования.

4. Разработка рабочей документации и создание опытного образца включает в себя следующие подэтапы:

- разработку конструкторской документации опытного образца;
- изготовление опытных образцов;
- корректировку конструкторской документации по результатам испытаний.

Конструкторская документация опытного образца разрабатывается в соответствии с утвержденным ТЗ на ее разработку. Конструкторская документация по своему объему и форме должна соответствовать требованиям действующей системы нормативной документации. Опытный образец изготавливают для окончательного определения технических и эксплуатационных характеристик разработанного прибора в процессе проведения необходимых испытаний и проверки разработанной технической документации.

Опытные образцы, как правило, изготавливают в опытном (экспериментальном) производстве при минимально необходимом технологическом оснащении. Их изготавливают и настраивают под наблюдением главного конструктора и его заместителей при обязательной приемке аппаратом технического контроля. Собранные и настроенные образцы подвергают лабораторным, затем стендовым испытаниям, которые организуют службы технического руководителя предприятия для определения степени готовности предъявления их на испытания.

Испытания проводят при участии представителей, подписавших договор и ТЗ, и представителей предприятия-изготовителя для всесторонней проверки соответствия опытного образца утвержденному ТЗ в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации прибора, а также для проверки его готовности к серийному производству.

Важной особенностью рассмотренного процесса является обеспечение метрологических задач, поставленных перед разработчиком, по созданию нового средства измерения. Эта особенность обусловлена тем, что при создании прибора должна решаться задача создания

Метрологического устройства, обеспечивающего стабильность измерительных свойств в течение времени и в условиях воздействия различных факторов окружающей среды.

Работа главного конструктора по выполнению всех перечисленных выше задач весьма сложна и ответственна. Она требует высокой квалификации в конкретной области измерений, критического анализа технических решений, умения своевременно принимать решения, правильные в технико-экономическом отношении. Для оказания помощи главному конструктору разработки в решении вопросов из числа наиболее квалифицированных работников конструкторского и технологических отделов назначаются заместители по конструкторской и технологической части.

Для обеспечения качественной подготовки к внедрению прибора в серийное производство от предприятия-изготовителя назначается заместитель главного конструктора разработки по серийному производству, который участвует в обсуждении результатов отдельных этапов, начиная от технического проекта. Работа коллектива разработчиков и других служб предприятия, принимающих участие в процессе проектирования прибора, регламентируется сетевыми графиками, составляемыми и согласуемыми специальной службой — бюро сетевого планирования и управления. Сетевой график дает представление о последовательности решаемых вопросов и взаимодействии служб и подразделений предприятия. Основным контрольным этапом на всех стадиях проектирования является предъявление советскому органу при техническом руководстве материалов, полученных на данной стадии, для их защиты.

Защита обеспечивает всестороннее обсуждение полученных материалов всеми ведущими специалистами предприятия и выработку коллективного решения о достигнутых результатах, о возможности предъявления разработки внешней комиссии, а также о качестве проделанной коллективом главного конструктора работы.

Работы по обеспечению надежности прибора при его проектировании ведутся в тесной взаимосвязи со всеми работами, проводимыми подразделением главного конструктора, так как практически нет ни единого технического решения, которое не могло бы явиться причиной появления отказов в производстве и эксплуатации прибора, и, что особенно важно для электронных измери-

тельных приборов, причиной появления отказов, которые не всегда можно обнаружить в самих приборах. Причем успех может быть достигнут в том и только в том случае, если работы по обеспечению надежности будут охватывать единым комплексом весь процесс проектирования.

При этом важно отметить две основные функции службы надежности: обеспечивающую и контрольную. Обеспечивающая функция заключается в том, что данная служба на предприятии является тем координирующим звеном, которое организует все работы по оценке и обеспечению надежности в подразделении главного конструктора разработки. В ряде случаев, требующих определенной квалификации исполнителей, служба надежности является непосредственным исполнителем работ. Контрольные функции заключаются в том, что без ее положительного заключения руководство не принимает решения об окончании каких-либо этапов разработки.

В настоящей книге на основе опыта автора сделана попытка проанализировать способы и приемы формирования качества и надежности средств измерения, а также рассмотреть организацию работ службы надежности в процессе проектирования ЭИА. Для понимания задач, которые ставит и решает служба надежности, в книге подробно рассматриваются особенности проектирования ЭИА и ее специфика.

# **1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ЭИА**

## **1.1. Применение и основные требования**

Одной из характерных черт современного этапа научно-технического прогресса является резкое возрастание роли электронных измерительных приборов в развитии всех отраслей науки и техники. Электронная измерительная аппаратура как наиболее массовая аппаратура общего применения используется, как правило, при проведении сложных научных и лабораторных исследований и экспериментов, связанных с точными измерениями, поэтому решение различных технических и научно-технических проблем в принципе связано с соответствующей аппаратурой электронных измерений.

Важна роль ЭИА также и при эксплуатации радиоэлектронных систем, так как проведение регламентных работ, проверка исправности, определение отказов, неисправностей и их локализация, ремонт и последующая настройка — все это требует исправно действующей ЭИА.

Значительное многообразие радиоэлектронных принципов и методов, заложенных в создание электронных измерительных приборов, обусловливает широкий диапазон их применения в качестве частотометров, измерительных генераторов, измерителей мощности и напряжения, измерителей формы сигналов и спектров и т. д.

Дальнейшее освоение новых процессов автоматизации производства и внедрение достижений науки ставит перед разработчиками ЭИА следующие задачи:

- 1) повышение точности измерений, разрешающей способности, расширение динамического диапазона измерений;
- 2) поиск новых методов измерений величин;
- 3) повышение надежности, долговечности и сохраняемости приборов при уменьшении их массы и габаритов;
- 4) повышение эффективности использования приборов за счет автоматизации измерений;

5) создание автоматических информационных измерительных систем.

Несмотря на имеющееся многообразие приборов, им присущи некоторые общие особенности. Рассмотрим кратко основные из них.

Главным при создании ЭИА является обеспечение требуемой точности измерений в заданных условиях эксплуатации. Этой цели подчинены все меры, предпринимаемые при ее конструировании. Например, ламповый вольтметр должен обеспечивать измерение напряжения с установленными метрологическими характеристиками. Для решения этой задачи выбираются схема и конструкция вольтметра, обеспечивающие прохождение измеряемого сигнала и его измерение с необходимой стабильностью без воздействия помех и искажений в приборе.

Требуемая точность измерений должна поддерживаться с помощью конструктивных мер в течение длительного промежутка времени, называемого межповерочным интервалом. Например, в ламповых вольтметрах в качестве такой меры применяют калибраторы напряжения.

В течение этого интервала электронный измерительный прибор находится в опломбированном состоянии и какой-либо его ремонт со сменой деталей невозможен. Это является важной особенностью электронного измерительного прибора.

Широкое распространение ЭИА в различных областях народного хозяйства предъявляет требования к ней с точки зрения устойчивости к различным внешним климатическим и механическим воздействиям. Это требование выполняют, изготавливая ЭИА в стационарном, лабораторном и полевом вариантах.

Электронная измерительная аппаратура, как правило, обслуживается квалифицированным персоналом (инженер, техник). В большинстве случаев ЭИА является аппаратурой многоразовой, восстанавливаемой после выполняемых отказов.

Важным требованием к электронной измерительной аппаратуре является то, что она не должна влиять на работу исследуемых устройств, т. е. подключение прибора к любой измеряемой цепи не должно перераспределять токи в этой цепи и вносить дополнительные искажения.

## **1.2. Классификационные признаки**

Электронные измерительные приборы классифицируют в соответствии со следующими признаками:

- назначение;
- принцип действия;
- условия эксплуатации;
- конструкция;
- точность;
- способ отсчета.

Более общей является классификация, подразделяющая ЭИА на следующие группы:

- 1) приборы общего применения — наиболее широко распространенные и предназначенные для использования в различных радиотехнических устройствах, независимо от назначения последних;
- 2) приборы специальные (сервисные) — узкого назначения и пригодные для использования только в определенных устройствах (объектах);
- 3) приборы встроенные — измерительные приборы, конструктивно входящие в состав радиотехнических устройств;
- 4) образцовые приборы (эталоны или меры) — измерительные приборы высокой точности, предназначенные для проверки и градуировки измерительных приборов более низкой точности;
- 5) измерительные приспособления — отрезки передающих линий, трансформаторы, контуры, аттенюаторы, нагрузочные сопротивления, излучатели и все другие калибровочные элементы с известными характеристиками.

В настоящей книге будут рассмотрены только приборы общего применения — как наиболее массовые.

Вопросам классификации приборов посвящено значительное число работ, например [3—8].

Представляет некоторый интерес так называемая обобщенная классификация, приведенная в [3], учитывающая назначение приборов, т. е. основную цель, для которой они предназначены (например, измерительные генераторы, усилители, приборы для импульсных измерений), и радиотехнические величины, для измерения которых они предназначены (например, приборы для измерения тока, напряжения, мощности, частоты).

Эта классификация в какой-то мере будет учитывать и принцип действия электронных приборов, основанный

на применяемом методе измерения, положенном в основу их принципиальной электрической схемы. В соответствии с указанной обобщенной классификацией электронные измерительные приборы можно условно разделить на три группы.

Первая группа — измерительные генераторы — наиболее широко распространенная и весьма многочисленная группа приборов общего применения. Данная группа приборов служит источником сигналов, используемых для воздействия на исследуемую или настраиваемую аппаратуру. Реакция исследуемой аппаратуры на

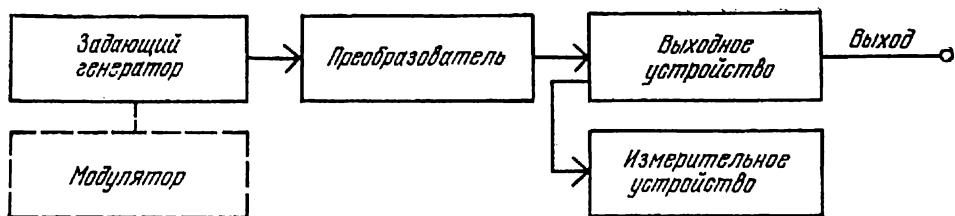


Рис. 1.1. Обобщенная схема измерительных генераторов.

данные воздействия и представляет собой ее экспериментальные характеристики. Приборы первой группы можно представить обобщенной схемой, изображенной на рис. 1.1. Задающий генератор — основной узел измерительного генератора, определяющий ряд важных характеристик выходного сигнала, например форму или периодичность. Преобразователь служит для повышения энергетического уровня сигнала, снимаемого с выхода задающего генератора или придания ему определенной формы. Выходное устройство служит главным образом для изменения уровня выходного сигнала и согласования выходного сопротивления прибора с нагрузкой. Измерительные цепи служат для измерения параметров сигналов, получаемых на выходе. Эти функции выполняют вольтметр, измеритель модуляции, измеритель мощности, осциллографический индикатор, волномер.

Измерительные генераторы по виду измерений подразделяют в соответствии с табл. 1.1.

Вторая группа — приборы для измерения параметров и характеристик сигналов. На вход этих приборов подается исследуемый сигнал (рис. 1.2). Как видно из рисунка, приборы второй группы имеют входное устройство, служащее для согласования измеряемой цепи со входом прибора и передачи сигнала от его за-

жимов к схеме преобразования. Зачастую во входных устройствах применяются аттенюаторы, направленные ответвители, линии задержки для согласования и обеспечения необходимого уровня сигнала.

Таблица 1.1

Наименование	Определение
Генераторы шумовых сигналов	Источники электрических шумовых сигналов, значение спектральной плотности мощности которых или мощность шума в требуемой полосе частот известна
Генераторы сигналов низкочастотные	Источники квазигармонических немодулированных или модулированных сигналов инфразвуковых, звуковых или ультразвуковых частот (до 200 кГц)
Генераторы сигналов высокочастотные	Источники квазигармонических немодулированных или модулированных сигналов высоких и сверхвысоких частот
Генераторы импульсов	Источник одинаковых и периодических видеоимпульсных сигналов, форма которых близка к прямоугольной, служащие для измерения
Генераторы сигналов специальной формы	Источники одиночных или периодических видеоимпульсных сигналов, форма которых отлична от прямоугольной
Генераторы качающейся частоты (спип-генераторы)	Источники квазигармонических сигналов, частота которых автоматически изменяется в пределах устанавливаемой полосы частот

Схема преобразования является основным узлом приборов указанной группы. Схема преобразования определяется типом прибора. В одних случаях, например в частотомерах, электронно-счетных схемах преобразования гармонический сигнал преобразуется в импульсный, а затем сравниваются их периоды следования с калиброванным отрезком времени. В электронных вольтметрах схема преобразования выполняет роль усилителя и детектора. В осциллографах схема преобразования сигнала представляет собой схему усилителя и схему развертки, которые обеспечивают вместе с показывающим устройством анализ сигнала.

В качестве схемы преобразования анализаторов спектра используется узкополосная система, выделяющая спектральные составляющие либо участки спектра.

В некоторых схемах преобразователя в сочетании с микропроцессорами могут осуществляться математические операции над измеряемым сигналом (логарифмирование, возведение в квадрат и т. д.) для получения желаемой математической зависимости между значением измеряемой величины и значением на шкале показывающего прибора.

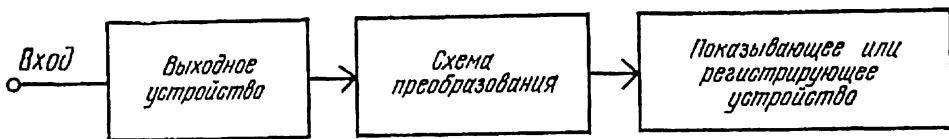


Рис. 1.2. Обобщенная схема приборов для измерения параметров и характеристик сигналов.

Показывающее устройство служит главным образом для индикации полученных результатов измерения в виде отклонений стрелки показывающего прибора или самописца, либо в виде сигнала, видимого на осциллографической трубке, либо в виде цифр и т. д.



Рис. 1.3. Обобщенная схема приборов для измерения характеристик и параметров многополюсников.

К приборам второй группы можно отнести следующие электронные вольтметры, цифровые вольтметры, измерители мощности, волномеры, частотомеры, фазометры, осциллографы, измерители модуляций, анализаторы спектра, измерители коэффициента нелинейных искажений, усилители измерительные.

Наиболее массовые приборы второй группы приведены в табл. 1.2.

Третья группа — приборы для измерения характеристик и параметров четырехполюсников, двухполюсников и различных элементов электронных схем.

К данной группе относятся как источники сигналов, так и схемы преобразования с индикаторами (рис. 1.3).

Таблица 1.2

Наименование подгруппы	Наименование вида	Определение вида
Приборы для измерения напряжения	Вольтметры постоянного тока	Приборы для измерения напряжения постоянного тока, шкалы которых градуируются в единицах напряжения
	Вольтметры переменного тока	Приборы для измерения напряжения синусоидальной или искаженной синусоидальной формы в диапазоне частот, шкалы которых градуируются в единицах напряжения
Приборы для измерения частоты и времени	Частотомеры электронно-счетные	Приборы для автоматического измерения среднего значения частоты и периода электрических колебаний
	Частотомеры резонансные	Приборы для измерения значения частоты, основанные на принципе электрического резонанса
Приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигналов и спектра	Осциллографы универсальные	Приборы для наблюдения формы сигнала и измерения параметров, использующие отклонение одного или нескольких электронных лучей для получения изображений функциональных зависимостей переменных величин, одной из которых, как правило, является время
	Измерители коэффициента амплитудной модуляции (модуляторы)	Приборы для измерения глубины амплитудной модуляции
	Осциллографы запоминающие	Приборы, обеспечивающие запоминание формы модуляции
	Анализаторы спектра	Приборы для наблюдения и измерения относительного распределения энергии, электрических колебаний в полосе частот

В приборах данной группы в качестве источника сигнала могут быть использованы измерительные генераторы, вырабатывающие сигналы требуемой формы. В качестве измерительного устройства здесь используются самые различные технические решения в соответствии с поставленной измерительной задачей (мосты, резонансные цепи и т. д.). Индикаторы в приборах данной группы используются такие же, как и в приборах второй группы. Приборы, относящиеся к данной группе, приведены в табл. 1.3.

Т а б л и ц а 1.3

Наименование подгруппы	Наименование вида	Определение вида
Приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств	Измерители коэффициента шума Приборы для исследования амплитудно-частотных характеристик Приборы для исследования переходных характеристик Измерители добротности	Приборы для измерения коэффициента шума приемных устройств и их элементов Приборы для измерения зависимости коэффициента передачи четырехполюсников от частоты Приборы для наблюдения и измерения переходных процессов четырехполюсника при воздействии на его вход одиночного перепада напряжения Приборы для измерения добротности катушек индуктивности, обеспечивающие получение результатов измерений в единицах добротности; в приборах может предусматриваться возможность определения потерь конденсаторов и сопротивлений компонентов и цепей
Приборы для измерения параметров компонентов с сосредоточенными постоянными	Измерители параметров (характеристик) электронных ламп	Приборы для измерения основных электрических параметров и (или) снятия семейств характеристик полупроводниковых приборов
Приборы общего применения для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов		

Рассмотрим другой классификационный признак — способ отсчета. Как известно, измерения делятся на прямые и косвенные.

Прямым называют измерение, непосредственно дающее определяемую величину, косвенным — измерение,

при котором интересующая нас величина определяется расчетным (косвенным) путем, т. е. вычисляется по данным, полученным в результате прямых измерений других величин.

Отсчет — это число, полученное в результате прямых измерений, указываемое индикатором прибора. Таким образом, способ отсчета определяется способом индикации прибора. По данному признаку приборы делятся на: стрелочные приборы, приборы с цифровым отсчетом, приборы, использующие электронно-лучевую индикацию.

Первый и третий тип приборов называются аналоговыми.

Еще одним классификационным признаком электронной измерительной аппаратуры является точность измерений. Для более подробного рассмотрения этого важного признака необходимо коснуться таких вопросов, как основные параметры приборов и погрешности измерений.

Основными параметрами прибора называются его главные показатели, характеризующие прибор как средство измерения (чувствительность, точность и т. д.). Они могут быть сформулированы для каждой из групп, подгрупп и видов приборов.

Рассмотрим основные параметры трех наиболее употребительных подгрупп и видов приборов: измерительных генераторов квазигармонических сигналов, электронных вольтметров и электронно-лучевых осциллографов.

Для измерительных генераторов квазигармонических сигналов такой характеристикой условимся считать пределы допускаемой погрешности:

- установки частоты;
- установки опорного значения выходного сигнала на согласованную нагрузку;
- установки коэффициента глубины амплитудной модуляции;
- установки девиации частоты в режиме частотной модуляции;
- установки длительности импульса.

Основными параметрами электронных вольтметров являются:

- диапазон и пределы измерения;
- основная погрешность;
- дополнительная погрешность;
- допускаемое смещение и нестабильность электрического нуля;

- входное сопротивление;
- требования к успокоению и перегрузкам.

Параметрами электронных осциллографов, по которым нормируется основная погрешность воспроизведения формы сигнала, являются:

- выброс на переходной характеристике;
- нелинейность амплитудной характеристики;
- нелинейность развертки;
- неравномерность вершины изображения импульса.

Кроме того, нормируется основная погрешность измерения амплитуды напряжения и основная погрешность измерения временных интервалов.

Вопрос о погрешностях измерений достаточно подробно рассмотрен в литературе [3,8], поэтому здесь мы ограничимся самым общим рассмотрением вопроса.

Важнейшим параметром прибора является основная погрешность. Основной погрешностью является погрешность (включая систематическую и случайную составляющую), свойственная прибору, находящемуся в нормальных условиях.

Важным параметром является и дополнительная погрешность, которая характеризует отклики прибора на различные внешние воздействия. Дополнительная погрешность определяется как изменение показания прибора, возникающее при отклонении одного из влияющих факторов от нормального значения или за пределы нормальной области значений.

По закономерности проявления погрешностей различают:

- систематические погрешности — постоянные по величине и знаку или проявляющиеся с определенной закономерностью (погрешность градуировки шкалы, температурная погрешность и т. д.);

- случайные погрешности, величина и знак которых заранее неизвестны и не могут быть точно предсказаны (дрейф нуля на выходе усилителя постоянного тока; погрешности, обусловленные действием флуктуационных помех и т. д.).

Способ выражения погрешностей определяется удобствами пользования.

Различают абсолютную погрешность, представляющую собой разность между показанием  $A$  прибора (измеренным значением) и истинным значением измеряемой величины  $A_0$  (т. с. измеренное образцовым

прибором или определенное теоретическим путем):

$$\Delta = \pm (A - A_0), \quad (1.1)$$

и относительную погрешность, определяемую соотношением

$$\delta = \pm (A - A_0) / A_0, \quad (1.2)$$

которое часто выражается в процентах.

Иногда погрешность можно выразить в виде суммы двух членов, из которых один зависит от измеряемой величины. В этом случае абсолютная погрешность

$$\Delta = \pm (aA + a), \quad (1.3)$$

где  $a$  — погрешность, выраженная в относительных значениях показаний прибора или номинального значения меры;  $a$  — погрешность, выраженная в абсолютных значениях и не зависящая от значения измеряемой величины. Относительная погрешность, выраженная в относительных значениях (или в процентах),

$$\delta = \pm (a + a/A). \quad (1.4)$$

В соответствии с установившейся практикой имеются следующие общие рекомендации по выбору погрешностей электронной измерительной аппаратуры:

— основная погрешность в абсолютных или относительных значениях измеряемой величины должна выбираться из ряда  $K \times 10^n$ , где  $K$  — одно из чисел 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6,  $n$  — одно из чисел 1; 0; —1; —3 и т. д.;

— дополнительная погрешность от изменения температуры указывается на каждые  $10^\circ\text{C}$  и не должна превышать  $1/2$  основной погрешности;

— дополнительная погрешность от изменения напряжения питания на  $\pm 10\%$  от номинального значения не должна превышать  $1/2$  основной погрешности.

Рассмотрим вопрос о точности электронных измерительных приборов. Классы точности приборов устанавливают в соответствии с основной погрешностью, обеспечиваемой данным видом прибора.

Рассмотрим классы точности наиболее употребительных видов приборов, представленные в табл. 1.4.

Приведем пример условного обозначения измерительного генератора в соответствии с классом точности: класс точности 1,0 по  $F$ -параметру, класс точности 1,0 по  $U$ -параметру, класс точности 5 по АМ-параметру, без

Нормирования класса точности по РМ-параметру: генератор  $F_1$   $U_1$  АМ<sub>5</sub> РМ.

Для каждого класса точности генераторов оговорены определенные значения дополнительной погрешности по каждому из влияющих факторов.

Таблица 1.4

Наименование приборов	Класс точности
Измерители частоты	0,2; 0,5; 1,0; 2,0
Измерители опорного значения выходного сигнала на согласованную нагрузку	0,5; 1,0; 2,0
Измерители коэффициента глубины амплитудной модуляции	5; 10; 20
Измерители девиации частоты в режиме частотной модуляции	5; 10; 15
Измерители длительности импульса	5; 10; 25

Таблица 1.5

Класс	Максимально допустимая погрешность воспроизведения формы сигнала, %				Основная погрешность измерения, %		Рабочая часть экрана, %
	выброс на переходной характеристике	нелинейность амплитудной характеристики	нелинейность развертки	неравномерность вершины изображения импульсов	амплитуды напряжения	временных интервалов	
I	2	3	3	1 (но не более 1% от максимальной амплитуды изображения)	±3	±3	100
II	3	5	5	1 (но не более 1,5% от максимальной амплитуды изображения)	±5	±5	70
III	5	10	10	1 (но не более 2% от максимальной амплитуды изображения)	±10	±10	50
IV	10	20	20	2 (но не более 3% от максимальной амплитуды изображения)	Не гарантируется или указывается в технической документации		—

Например, нестабильность частоты генераторов различных классов точности за любые 15 мин работы после самопрогрева при нормальных условиях эксплуатации не должна превышать:

Нестабильность	$10 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$250 \cdot 10^{-6}$	$400 \cdot 10^{-6}$
частоты				
Класс точности генератора	0,2	0,5	1,0	2,0

При необходимости нормируются также дополнительные погрешности установки частоты при изменении температуры окружающей среды, напряжения питания и уровня выходного сигнала. Могут нормироваться также дополнительные погрешности и на другие параметры. В качестве примера в табл. 1.5 указаны классы точности в соответствии со значениями основных погрешностей для электронно-лучевых осциллографов.

Классы точности электронных вольтметров определяются в соответствии с основной погрешностью:

Класс точности вольтметра	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5	4,0	6,0
Основная погрешность, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$	$\pm 6,0$

Для делителей напряжений, применяемых в комплексе с электронными вольтметрами, введено еще одно значение класса точности: 0,05, соответствующее значению основной погрешности, равной  $\pm 0,05$ . Величины дополнительных погрешностей для таких факторов как температура, напряжение питания также нормируются.

Следует отметить присущую всем электронным измерительным приборам зависимость основной погрешности от технических параметров (частоты, пределов измерений и т. д.) (рис. 1.4). В связи с этим для приборов с несколькими поддиапазонами, шкалами и пределами измерения допускаются разные значения основной погрешности для разных поддиапазонов, шкал и пределов измерения.

Эта зависимость в сочетании с имеющимся многообразием в построении различных электронных приборов создает определенные трудности в создании обобщенного параметра, на основе которого можно было сравнить различные приборы даже в пределах одного вида. Попытка создать такой параметр рассматривается в [10], где при оценке качества измерительных устройств при-

нимают во внимание такие параметры, как точность, чувствительность, потребление и быстродействие, которые должны быть рассмотрены во взаимосвязи.

Показателем, всесторонне учитывающим качество измерительного прибора, может служить энергетический порог чувствительности прибора, выраженный формулой

$$\mathcal{E}_n = \gamma^2 U_{\min} I T, \quad (1.5)$$

где  $\gamma$  — основная погрешность прибора;  $U_{\min}$  — предельная чувствительность по напряжению;  $I$  — потребляемый ток (показатель потребления);  $T$  — время установления показаний (показатель быстродействия).

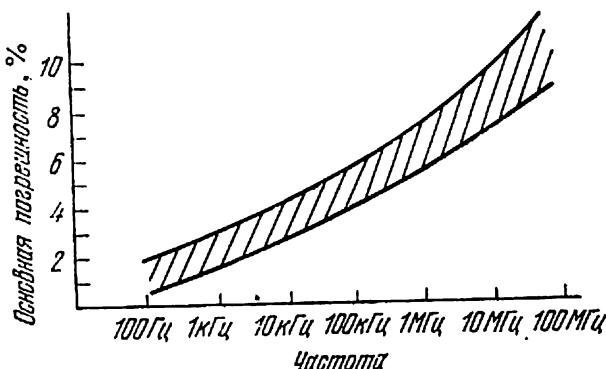


Рис. 1.4. Типовая зависимость основной погрешности ламповых вольтметров от частоты.

Следующим классификационным признаком ЭИА являются условия эксплуатации. При проектировании и производстве ЭИА необходим учет, помимо требований к основным параметрам, требований к прибору с точки зрения устойчивости к тем воздействиям (в частности, к воздействию окружающей среды и механическим воздействиям), которые могут встретиться при ее эксплуатации.

Нормативной документацией определены пять групп приборов, принадлежность к которым для каждого прибора указывается в ТЗ на проектирование и в ТУ:

- I группа — стационарные приборы,
- II группа — переносные лабораторные приборы,
- III группа — приборы для работы в складских условиях,
- IV группа — приборы для работы на открытом воздухе,

V группа— приборы для работы в сложных метеорологических условиях.

В указанных условиях эксплуатации должна быть обеспечена устойчивая работа приборов, при этом дополнительные погрешности не должны выходить за пределы норм, установленных техническими условиями. Свойство приборов обеспечивать устойчивую работу при изменении влажности и температуры называется влагоустойчивостью и температуроустойчивостью соответственно.

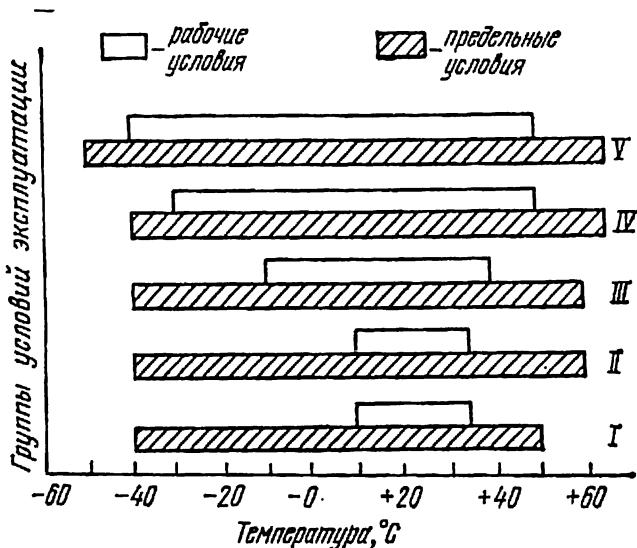


Рис. 1.5. Диапазоны значений рабочих и предельных температур для ЭИА.

Кроме того, приборы должны сохранять или восстанавливать требуемые характеристики в пределах установленных норм после пребывания в условиях эксплуатации, характеризуемых крайними значениями температуры и влажности. Это свойство называется температуропрочностью и влагопрочностью соответственно. Для примера на рис. 1.5 изображены диапазоны значений рабочих и предельных температур для ЭИА.

Еще одно требование, связанное с условиями эксплуатации,—это устойчивость к механическим воздействиям, которым они подвергаются в процессе эксплуатации (транспортировка, удары и сотрясения при перемещении с одного места на другое). Иными словами, приборы должны обладать вибпрочностью,

ударопрочностью и прочностью при транспортировании. Нормативной документацией устанавливаются конкретные нормы испытательных режимов при проведении механических испытаний по группам приборов.

Следующим аспектом, характеризующим условия эксплуатации приборов, является временной режим работы. Условия использования требуют для ЭИА непрерывной работы в течение не менее чем 8 ч с учетом времени самопрогрева, если оно не превышает 2 ч. Это означает, что электронный измерительный прибор должен быть сконструирован так, чтобы после установления необходимого температурного режима (времени самопрогрева) он стабильно работал, т.е. его характеристики соответствовали бы требованиям технических условий в течение длительного времени, превышающего 8 ч. По истечении указанного времени работа прибора без перерыва не гарантируется. Время прогрева ЭИА лежит в пределах 1—120 мин, и при необходимости разработчик уточняет его.

Рассмотрим далее еще ряд эксплуатационных особенностей электронных измерительных приборов, которые в определенной степени либо оказывают влияние на их надежность, либо предъявляют к ней определенные требования. К таким особенностям относятся:

- интенсивность использования в течение определенного отрезка времени;
- требования к квалификации обслуживающего персонала;
- последствия, вызываемые отказом прибора;
- степень использования отдельных родов работы прибора;
- реальные климатические и механические воздействия на прибор.

Вопрос об интенсивности использования электронных измерительных приборов, как и прочие эксплуатационные особенности, будет интересовать нас применительно к лабораторной измерительной аппаратуре, т.е. к приборам, относящимся ко II группе (табл. 1.6.). Строго говоря, в указанную группу входят не только лабораторные, но и так называемые цеховые приборы, эксплуатируемые непосредственно в цехах предприятий-изготовителей. Доля цеховых приборов к общему числу лабораторных составляет примерно 40—45%. Отличи-

тельным чётам к цеховых приборов по сравнению с лабораторными являются более интенсивная их эксплуатация в течение дня, неполное использование их возможностей, так как работа в условиях заводского конвейера производится в одном-двух режимах.

Интенсивность эксплуатации прибора можно оценить его коэффициентом использования, под которым понимают отношение фактически проработанных прибором часов  $t_{\Phi}$  за определенный промежуток времени (как правило, за год) к общему количеству часов в указанном промежутке  $t_0$ , т. е.

$$K_{ii} = t_{\Phi} / t_0. \quad (1.6)$$

Средние значения величины  $K_{ii}$  для некоторых видов электронных измерительных приборов можно проиллюстрировать данными табл. 1.6.

Таблица 1.6

Тип ЭИА	$K_{ii}$	
	лабораторные условия	цеховые условия
Электронные вольтметры	0,1	0,4
Электронно-лучевые осциллографы	0,12	0,45
Измерительные генераторы	0,1	0,3

На практике значение  $K_{ii}$  используют для определения технического ресурса прибора, подсчета экономической эффективности и других величин. С помощью  $K_{ii}$  можно подсчитать общую наработку прибора в течение года либо срока службы. Так, например, наработка указанных видов ЭИА в течение года по выборочным данным составляла:

- электронные вольтметры: для лабораторных условий — 860 ч, для цеховых — 3450 ч;
- электронно-лучевые осциллографы: для лабораторных условий — 1030 ч, для цеховых — 3880 ч;
- измерительные генераторы: для лабораторных условий — 860 ч, для цеховых — 2590 ч.

Квалификация обслуживающего персонала является важным фактором в конструировании аппаратуры, учитывающим требования инженерной психологии. Как видно из гистограммы на рис. 1.6, в большинстве слу-

чаев ЭИА обслуживает инженерно-технический персонал, особенно это характерно для лабораторной ЭИА.

Цеховые приборы обслуживает менее квалифицированный персонал, это обусловлено тем, что в производственных условиях от прибора требуется обеспечение 1—2 несложных измерительных функций, в этом случае его может обслуживать и рабочий.

Последствия, вызываемые отказом ЭИА, бывают самыми различными и зависят от характера того процесса, который обслуживается прибором. В цеховых условиях при выходе из строя электронного измерительного прибора, как показывает практика, могут быть следующие последствия:

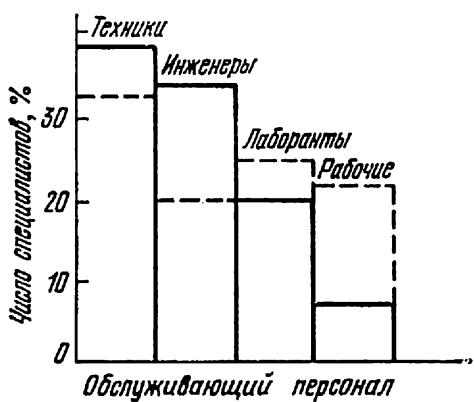


Рис. 1.6. Гистограммы, характеризующие квалификацию обслуживающего ЭИА персонала (— лабораторные условия; — — — цеховые).

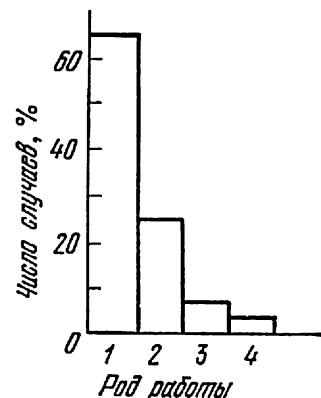


Рис. 1.7. Гистограмма, характеризующая степень использования рода работы электронных вольтметров.

Обозначения рода работ: 1 — измерение напряжения; 2 — измерение сопротивления; 3 — предварительное усиление; 4 — специальный.

- введение в обращение резервного прибора (60—80% всех случаев);
- простой оборудования (15—20% случаев);
- выпуск некачественной продукции (5—20% случаев).

Аварий на производстве, обусловленных выходом приборов из строя, практически не происходит.

Введение в обращение разервного прибора является наиболее распространенной мерой борьбы с отказами. В этом случае предприятию-изготовителю приходится

идти на дополнительные затраты, связанные с приобретением и обслуживанием избыточного количества приборов, что снижает экономическую эффективность производства. В тех случаях, когда приобретение и содержание резервных приборов невозможно, отказ прибора приводит к двум другим последствиям.

Простой оборудования, либо простой отдельных участков предприятия-изготовителя, вызванный неисправностью прибора, с одной стороны, приводит к неритмичности в работе, что зачастую является причиной выпуска продукции низкого качества, а с другой — связан с экономическими потерями.

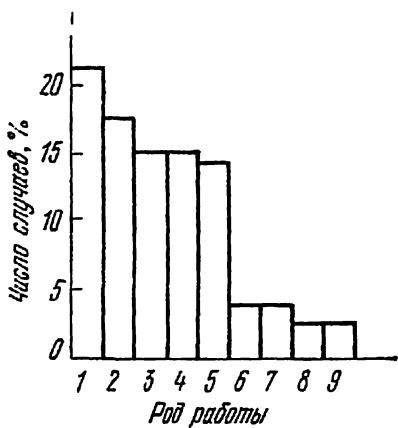


Рис. 1.8. Гистограмма, характеризующая степень использования рода работы электронно-лучевых осциллографов.

Обозначения рода работ: 1 — режим ждущей развертки; 2 — режим непрерывной развертки; 3 — измерение амплитуды; 4 — измерение временных интервалов; 5 — периодические колебания; 6 — внутренний запуск; 7 — подача сигнала на отключающие пластинки; 8 — синхронизация развертки от сети; 9 — внешняя модуляция луча по яркости.

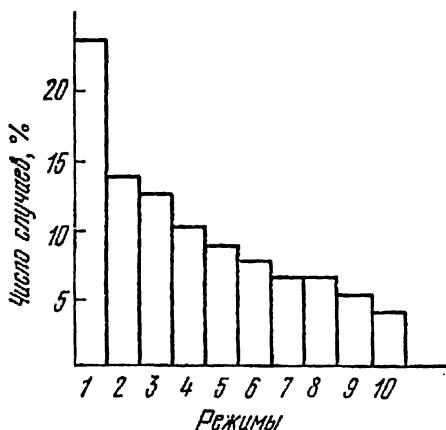


Рис. 1.9. Гистограмма, характеризующая степень использования рода работы измерительных генераторов.

Обозначения рода работ: 1 — непрерывная генерация; 2 — внутренняя ЧМ; 3 — внутренняя АМ; 4 — меандр; 5 — внешняя импульсная модуляция; 6 — синусоидальная модуляция; 7 — внешняя АМ; 8 — внешняя ЧМ; 9 — импульсная модуляция с внешней синхронизацией; 10 — несущее колебание.

Выпуск некачественной продукции является следствием тех отказов прибора, которые не обнаруживаются оператором (неявные отказы). В этом случае погрешность в показаниях прибора переносится на выпускаемую продукцию, параметры которой объективно могут не соответствовать требованиям технических условий. В лабораторных условиях наиболее типичными являются введение резервного прибора и простой оборудования.

На гистограммах, изображенных на рис. 1.7 — 1.9, приведены распределения, характеризующие степень использования отдельных родов работы приборов у потребителей.

Рассмотренные распределения свидетельствуют об имеющихся тенденциях использования отдельных родов работы при эксплуатации указанных электронных измерительных приборов. На основании этого к конструкции и схеме приборов должны быть предъявлены повышенные требования в части обеспечения надежности работы прибора в указанных режимах.

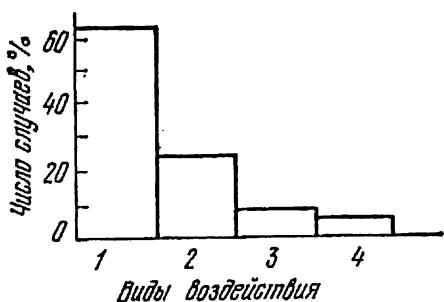


Рис. 1.10. Гистограмма, характеризующая распределение видов механических воздействий при эксплуатации лабораторной ЭИА.

Обозначения воздействий: 1 — длительно находятся на месте; 2 — частая переноска; 3 — частая транспортировка; 4 — другие факторы.

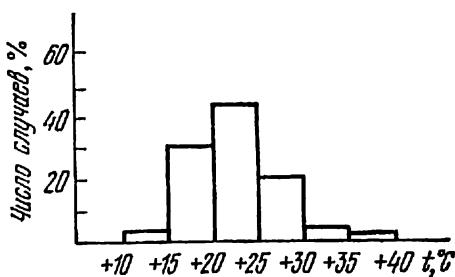


Рис. 1.11. Гистограмма, характеризующая распределение окружающей температуры для лабораторной ЭИА (летние условия).

Механические воздействия в процессе эксплуатации в лабораторных и цеховых условиях выражаются в ударах и сотрясениях, испытываемых приборами при их переносе и транспортировке. На рис. 1.10 изображена гистограмма, характеризующая распределение воздействий на приборы, вызванных различными причинами. Из гистограммы видно, что только 30 — 40 % приборов подвергается механическим воздействиям при частой переноске и транспортировке. Причем для приборов лабораторного типа фактор частоты переноски выражен сильнее, чем для цеховых. Это объясняется тем, что при налаженном серийном производстве приборы длительное время находятся на оборудованных рабочих местах.

Окружающая температура является одним из важнейших факторов, влияющих на надежность аппаратуры.

Этот вопрос подробно рассмотрен в литературе применительно к различным типам радиоэлектронной аппаратуры [11], и ЭИА не является специфичной в этом смысле. Важно лишь определить количественно пределы изменения окружающей температуры.

Как видно из рис. 1.11, в летнее время температура в местах эксплуатации приборов находится в пределах  $+15\dots+30^{\circ}\text{C}$  с достоверностью 95 %, т. е. в летнее время для лабораторной ЭИА наблюдается незначительное отклонение от нормальных условий эксплуатации ( $+20\pm 5^{\circ}\text{C}$ ).

В зимнее время такой однородности условий эксплуатации не наблюдается. Данные указывают на наличие некоторой двухмодальности в распределении. При этом первая мода лежит в интервале  $+10\dots+15^{\circ}\text{C}$ , вторая — в интервале  $+18\dots+20^{\circ}\text{C}$ . Как известно из практики эксплуатации, наиболее критичным фактором с точки зрения надежности, способствующим появлению внезапных отказов, является высокая температура (более  $+25\dots+30^{\circ}\text{C}$ ). Таким образом, в летнее время прибор может оказаться менее надежным, чем зимой.

### 1.3. Периодические поверки

Ранее были рассмотрены особенности электронных измерительных приборов как средств измерений и указана главная из них — обеспечение необходимой точности измерений в течение требуемого межповерочного интервала. Указанное требование должно обеспечиваться, с одной стороны, необходимыми конструктивными мероприятиями, с другой — определенной системой мероприятий при эксплуатации приборов.

В систему мероприятий по поддержанию метрологических свойств прибора в эксплуатации входят регламентные работы, состав которых определяется следующими мероприятиями:

- внешний осмотр прибора;
- осмотр внутреннего состояния (монтаж, крепление, состояние отдельных элементов и узлов);
- осмотр состояния лакокрасочных и гальванических покрытий;
- чистка воздушных фильтров, чистка от грязи, пыли, коррозии;

- проверка крепления органов управления и регулировки, плавности их действия и четкости фиксации;
- проверка крепления узлов, состояния контровки, надежности контактных соединений, отсутствия сколов и трещин на деталях из пластмасс;
- периодическая поверка прибора.

Проведение указанных регламентных работ в строго запланированные сроки дает возможность реально повысить эксплуатационную надежность прибора.

Как показывает изучение сложившейся практики регламентных работ, перечисленные выше мероприятия имеют разную продолжительность. Например, внешний осмотр прибора, как правило, проводится не реже одного раза в полгода, остальные мероприятия могут иметь и другую периодичность в зависимости от специфики конструкции. Так, например, при эксплуатации СВЧ приборов, имеющих значительное количество механических узлов, чаще других регламентных работ проводятся работы, связанные с проверкой плавности хода движущихся частей, отсутствия люфта, надежности их крепления и фиксации.

Важнейшим мероприятием, связанным с поддержанием метрологических свойств прибора в эксплуатации, является периодическая поверка, которая, как видно из ее названия, проводится через определенный период, называемый межповерочным интервалом. В отличие от других регламентных работ периодические поверки проводят органы метрологической службы, имеющие соответствующее на то разрешение. При этом лица, проводящие указанную поверку (проверители), должны иметь специальное удостоверение, выдаваемое после соответствующего обучения в органах Госстандарта СССР.

К проведению периодической поверки не могут допускаться лица, осуществляющие сборку, наладку или юстировку прибора при выпуске его из ремонта. Периодические поверки проводят в соответствии с календарными графиками поверки, утверждаемыми руководством предприятия, эксплуатирующего ЭИА или в соответствии с требованиями стандартов.

Главным в системе проведения периодических поверок является определение продолжительности межповерочных интервалов. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

В практике определения межповерочного интервала для их выбора пользуются информацией об отказах приборов во время эксплуатации.

Более точные результаты можно получить, если связать величину межповерочного интервала со средней наработкой на отказ

$$T_{\text{пов}} = f(T_{\text{ср}}). \quad (1.7)$$

Таблица 1.7

Характерная особенность прибора	Обозначения коэффициента	Значения коэффициента (цифры условные)
Интенсивность эксплуатации (число часов работы в сутки):	$i_1$	
1		2,5
2		1,5
4		1,0
8		0,7
Число основных параметров:	$i_2$	
1		2,0
2—5		1,0
более 5		0,5
Отношение числа контролируемых с помощью встроенных индикаторов основных параметров к общему числу основных параметров:	$i_3$	
0,2		0,5
0,25—0,5		0,7
0,5—0,7		1,0
более 0,7		1,5
Условия эксплуатации:	$i_4$	
близкие к верхней границе рабочих климатических условий		0,5
нормальные		1
близкие к нижней границе рабочих климатических условий		1,5
Наличие 20% запаса по основным параметрам	$i_5$	2,0
Отсутствие 20% запаса по основным параметрам		0,5

Остается лишь определить вид функциональной зависимости, но это оказалось весьма трудной проблемой, так как отказы, обнаруживаемые во время периодической поверки, являются неявными, в противном случае они бы обнаруживались и устраивались в процессе эксплуатации в рамках межповерочного интервала.

На появление неявных отказов, речь о которых будет идти, влияет множество факторов: схемные и конст-

руктивные особенности, точность приборов, условия возникновения и характер отказа и т.д.

С достаточной для практики точностью межповерочный интервал можно определить с помощью формулы

$$T_{\text{пов}} = 0,35I \sqrt{T_{\text{ср}}}, \quad (1.8)$$

где  $T_{\text{пов}}$  и  $T_{\text{ср}}$  — соответственно межповерочный интервал в месяцах и средняя наработка на отказ в часах;

$I$  — коэффициент, определяемый из формул  $I = \sum_{j=1}^5 i_j$

(значение  $i_j$  выбирают из табл. 1.7).

Условность указанных в табл. 1.7 значений коэффициентов состоит в том, что их величины рассчитаны для определенных значений допустимого процента забракования прибора в процессе периодической поверки, который в каждом конкретном случае может варьироваться.

#### 1.4. Особенности конструкции

Рассмотрим особенности конструирования в следующей последовательности:

- основные вопросы, решаемые при конструировании ЭИА;
- характерные особенности конструкции ЭИА;
- основные тенденции конструирования ЭИА.

Конструирование представляет собой процесс отражения в технической документации (чертежах, схемах, описаниях и т.д.) размеров, структуры, формы, материала и внутренних связей будущего прибора.

Основными задачами, которые ставятся перед конструктором при создании прибора, являются обеспечение таких мероприятий, которые наряду с удовлетворением технических требований создали бы оптимальные условия для наилучшей защиты прибора от внешних воздействий, для наилучшей совместимости прибора с объектом, на котором он устанавливается, и с тем, кто его обслуживает (эргономические требования), для получения требуемой надежности, долговечности, для серийного производства с учетом технологичности, для достижения необходимых эстетических показателей, патентноправовых и т. д., т. е. речь идет о достижении определенных показателей качества.

Защита от внешних воздействий необходима для создания нормальных условий функционирования элементов, составляющих схему прибора. Для лабораторной ЭИА влияющим фактором является температура (о характере ее распределения можно судить по данным гистограммы, приведенной на рис.1.11 при влажности, величина которой для лабораторной ЭИА не превышает 80 %). Кроме того, данная аппаратура должна иметь защиту от вибраций и ударов. Указанные требования реализуются известными методами, описанными различными авторами для радиоэлектронной аппаратуры [11, 12], поэтому нет смысла останавливаться на этом вопросе, так как ЭИА не содержит в этой части какой-либо специфики.

Лабораторная ЭИА монтируется либо в стоечном, либо в переносном варианте, следовательно, объектом, на котором она устанавливается, является пол либо поверхность стола. Переносная лабораторная ЭИА всегда работает в комнате на рабочих столах и не работает при переносе с места на место. Перенос осуществляется одним-двумя людьми, следовательно, в качестве одного из условий совместимости с обслуживающим персоналом должно быть введено ограничение по массе 50 кг. Для стоечного варианта такое ограничение составляет 150 кг. В аппаратуре должны быть предусмотрены специальные приспособления для ее перемещения.

Эргономические требования характеризуют комплекс различных свойств, определяемых системой «человек — прибор». Эргономические требования характеризуются определенными показателями: гигиеническими, антропометрическими, психофизиологическими.

Гигиенические показатели характеризуют соответствие прибора определенным санитарно-гигиеническим нормам и рекомендациям. С учетом специфики ЭИА такими показателями являются:

- уровень радиации, яркость свечения экрана ЭЛТ в панорамных приборах, СВЧ излучение;
- уровень шума, создаваемого движущимися частями (например, вентилятором).

Антропометрические показатели характеризуют приспособленность прибора и его отдельных органов к типичным размерам и форме человеческого тела и его частей. Для ЭИА эти показатели определяют размеры и формы органов управления, их взаимное

расположение. Применительно к стоечным приборам — это расположение отдельных блоков по высоте.

Психофизиологические показатели характеризуют соответствие прибора физиологическим свойствам человека и особенностям функционирования его органов чувств (скоростным и силовым возможностям человека, возможностям его зрительного аппарата и т. д.), а также трудовым навыкам. Для ЭИА эти показатели определяют скоростные реакции человека (скорость вращения либо перемещения органов управления прибором, скорость восприятия информации), его силовые возможности (расчетное нажимное усилие на органы управления), а также соответствие прибора имеющимся трудовым навыкам человека (например, поворот ручки настройки вправо должен соответствовать движению шкалы вправо).

Психофизиологические показатели определяют распределение функций между прибором и человеком в системе «человек — прибор». Из психофизиологических показателей вытекают определенные рекомендации к органам управления прибором, которые должны быть логически сгруппированы и иметь распределение, соответствующее расположению связанных с ними групп индикаторов или мнемосхем; расположение органов управления внутри группы должно соответствовать размещению индикаторов на панели информации и последовательности их использования в процессе управления системой. В конструкции некоторых типов органов управления должны учитываться особенности биомеханики движений человека.

В практике проектирования приборов с учетом указанных рекомендаций сложились определенные правила в конструировании органов управления [9].

Необходимые эстетические показатели ЭИА обеспечивают внешний вид, который подчеркивает ее гармоничность, оригинальность и выразительность. Подробная характеристика указанных свойств рассмотрена в [13 — 16].

Гармоничность прибора — это согласованность элементов его формы между собой, а также согласованность между его формой и содержанием, между формой прибора и средой, в которой осуществляются измерения. Свойство гармоничности имеет формальную и содержательную сторону. Формальная гармонич-

ность изделия относится только к элементам формы и их соотношениям. Это — пропорциональность, симметричность или обоснованная асимметричность, сомасштабность, повторяющаяся закономерность проявления яркостных, цветовых и других соотношений; повторяющаяся закономерность структурного строя формы и т. д. Содержательная гармоничность включает в себя согласованность формы прибора и его содержания. Здесь важно учитывать основное содержание прибора, связанное с его прямым назначением и как инструмента для научных исследований и технических измерений.

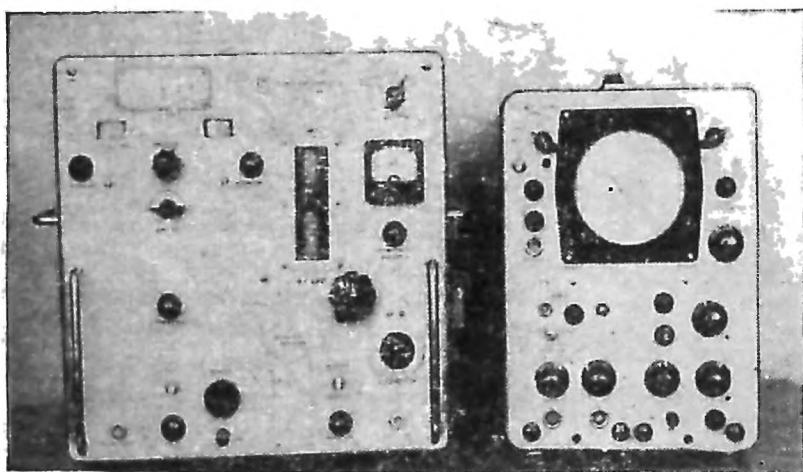


Рис. 1.12. Внешний вид осциллографа (справа) и генератора (слева).

Оригинальность прибора — это своеобразие элементов формы и их соотношений, своеобразие выражаемого одного или нескольких содержательных свойств прибора, которые наглядно отличают его от однотипных приборов. Понятие оригинальности обязательно предполагает сохранение определенных традиционных признаков (отраслевых, фирменных и др). Так, например, конструкция осциллографических приборов традиционно отличалась от конструкции измерительных генераторов (рис. 1.12). Свойство оригинальности, к которому всегда естественно стремится конструктор прибора, не должно являться самоцелью, его следует выполнять в рамках имеющихся требований к стандартизации и унификации.

Выразительность прибора связана с его эстетическим восприятием. Составляющими выразитель-

ности прибора являются: декоративно-защитные покрытия, расположения органов управления, надписей, формы футляра и т. д. Выразительность в основном достигается при отработке базовых конструкций прибора.

## **1.5. Технологичность, стандартизация и особенности производства**

Главной производственной характеристикой конструкции ЭИА является **технологичность** — степень пригодности конструкции к промышленному выпуску в заданном количестве с минимальной себестоимостью. По вопросу о технологичности имеется обширная литература [18—20]. Остановимся лишь на основных моментах, характеризующих технологичность ЭИА.

Способ обеспечения технологичности в значительной степени определяется характером и объемом производства. Рассмотрим основные особенности, присущие производству ЭИА.

Применительно к лабораторной ЭИА — это серийное производство с характерной спецификой для каждого вида прибора. Например, для осциллографических приборов, вольтметров и генераторов серийность — главный показатель производства и составляет в отдельных случаях более десятка тысяч экземпляров в год, в то время как для других видов приборов (рефлектомеры, измерительные приемники и др.) серийность составляет одну-две сотни в год, а в ряде случаев и меньше. Характерной особенностью производства ЭИА является то, что с увеличением ступени (например, при переходе от сборки узлов к приборам) серийность уменьшается незначительно, в отличие, например, от производства ЭВМ. По своей структуре это в основном сборочное производство с номенклатурой деталей собственного изготовления, превышающей 10—20 тысяч штук, и таким же количеством покупных изделий [16], с развитой системой заготовительных цехов, т. е., иными словами, производство характеризуется большой номенклатурой деталей и узлов, превышающей серийность. В таких условиях рентабельность предприятий-изготовителей обеспечивается с большим трудом.

Технологический процесс изготовления прибора включает в себя заготовительные и сборочные операции.

К заготовительным операциям следует отнести изготавление футляров и шасси приборов, печатных плат, вязку жгутов для межблочных соединений, изготовление различных установочных элементов и т. д.

Основными видами сборочных операций являются установка деталей, плат и узлов, осуществление монтажа и межблочных соединений с последующей проверкой. Трудоемкость сборочных работ составляет, как правило, 30—40% от общей трудоемкости. После сборочных операций осуществляются операции настройки, регулировки и контроля. В последние годы получила широкое распространение технологическая приработка. Операцией, венчающей процесс производства, является испытание приборов, осуществляемое в специальных подразделениях предприятия-изготовителя на специальном испытательном оборудовании (стендах, камерах).

При сборке узлов и блоков работают с малыми уровнями сигналов, что дает возможность регулировать выходные параметры без специальных мер защиты.

Преобладающим видом труда (60%), в основном для приборов 1-го и 2-го поколений, при сборочных работах является ручной труд. Применение передовых методов конструирования, связанных с установкой печатных плат и интегральных микросхем, открывает перспективы в организации автоматической сборки, хотя из экономических соображений она не всегда выгодна.

В настоящее время можно считать завершенным процесс перехода от объемного к печатному монтажу, что создает необходимые условия для механизированной сборки компонентов на платах.

Еще одним шагом в указанном направлении является внедрение автоматизированных средств контроля, которое обеспечивает повышение производительности труда вследствие сокращения времени на контроль, настройку и регулировку узлов и блоков и на проверку правильности их монтажа, позволяет сократить количество контролеров, ввести автоматическую регистрацию контрольных данных на бумаге, фотопленке или перфоленте.

Высокие требования к точности выходных параметров определяют широкое применение регулировочных элементов в узлах и приборах, в связи с чём процесс должен иметь достаточное количество контрольных операций, обеспечивающих необходимые точности изготовления.

Изготовление приборов требует высокой культуры производства, определяемой главным образом квалификацией работников, занятых на сборке, монтаже и регулировке, и высокой исполнительской дисциплиной.

Критериями, определяющими технологичность, как известно, являются:

- наибольшая унификация и стандартизация деталей и узлов, применение нормализованных деталей и узлов;
- наименьшая трудоемкость в производстве;
- отсутствие необходимости в сложных операциях и в рабочих высокой квалификации;
- возможность изготовления на простом оборудовании без применения сложных и дорогих специальных приспособлений и инструментов;
- наименьшая затрата времени на подготовку производства;
- наиболее полная взаимозаменяемость деталей и узлов, обеспечивающая сборку без подбора, доделки и подгонки;
- наибольшая приспособленность для механизированных и автоматизированных технологических процессов;
- возможность параллельной сборки узлов и блоков, сокращающей цикл сборки всего изделия;
- отсутствие необоснованно «узких» допусков на выходные параметры.

Рассмотрим некоторые из этих критериев, затрагивающих специфику ЭИА.

Унификация и стандартизация являются характеристиками качества изделий, так как они ускоряют процессы разработки и внедрения в производство вследствие сокращения типоразмеров деталей, узлов и приборов и тем самым уменьшают количество требуемых специальных инструментов и оснастки, создают предпосылки для специализации и кооперирования производства, облегчают организацию обеспечения потребителей запасными деталями и узлами, удешевляют производство и потребление и, следовательно, повышают экономичность.

Унификация есть способ типизации, т. е. сведения многообразия к одному типу, при котором размеры и параметры выбранных типов получены умножением и делением на целые числа размеров и параметров одного исходного, базового.

Стандартизация есть установление обязательных норм на параметры продукции или производственные процессы для приближения качества приборов к уровню лучших образцов и для обеспечения однородности, взаимозаменяемости и снижения трудоемкости производства.

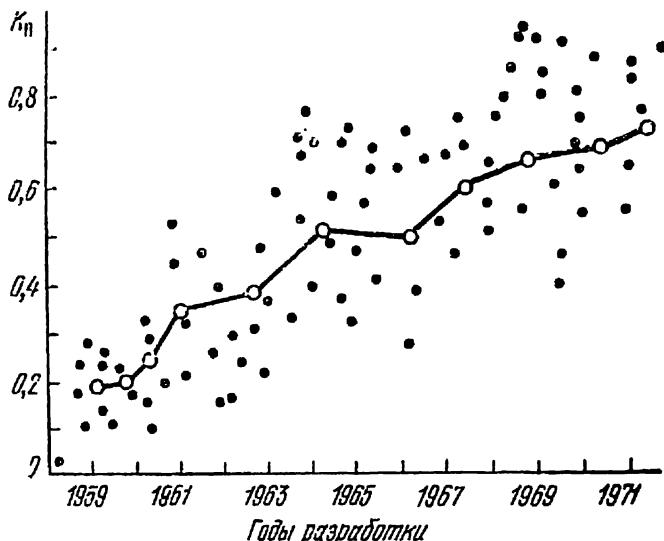


Рис. 1.13. Корреляционное поле и эмпирическая линия регрессии, характеризующая изменение коэффициента применяемости  $K_{\text{пп}}$  ЭИА во времени.

Уровень стандартизации и унификации для ЭИА принято оценивать коэффициентом применяемости

$$K_{\text{пп}} \equiv (n_{\text{ст}} + n_y) / n_o, \quad (1.9)$$

где  $n_{\text{ст}}$  — количество стандартизованных деталей в приборе,  $n_y$  — количество унифицированных деталей в приборе,  $n_o$  — общее количество деталей.

Рис. 1.13 характеризует изменение величины  $K_{\text{пп}}$  во времени, причем ясно видна тенденция ее увеличения. Как показывает практика, для ЭИА величину  $K_{\text{пп}}$ , равную 0,75—0,80, следует считать близкой к оптимальной, так как при ее уменьшении эффективность изготовления резко падает, а при увеличении уменьшается эффект новизны прибора, его оригинальность.

В настоящее время в ЭИА широко применяются так называемые унифицированные функциональные узлы (УФУ) специального измерительного назначения. Такими узлами являются аттенюаторы, линии задержки, ферритовые вентили, гетеродины, измерительные ответ-

вители, термисторные и болометрические головки для измерения мощности СВЧ колебаний, волноводно-коаксиальные переходы, трансформаторы согласования, блоки питания, унифицированные индикаторные блоки. Одним из способов улучшения показателей унификации ЭИА является выбор рациональной номенклатуры приборов, предполагающий разработку и создание оптимальных параметрических «рядов» типов приборов, при

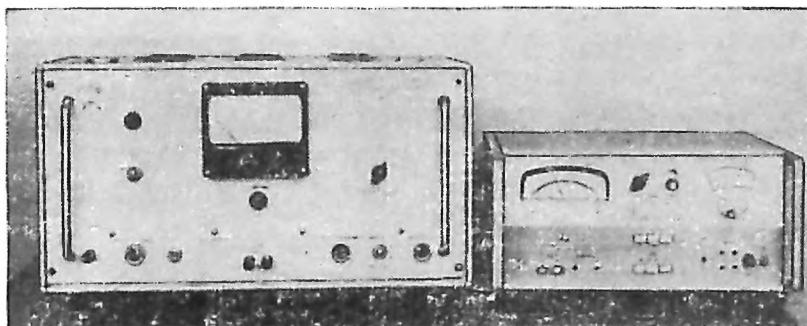


Рис. 1.14. Устаревшая (слева) и современная (справа) конструкции приборов.

котором весь ряд строится на основании одной выбранной базовой модели. Примером «рядов» ЭИА, построенных на одной базовой модели, являются комплекты стробоскопических осциллографов спектра, работающих в широком диапазоне характеристик исследуемых сигналов. Осциллографы, созданные на основе одной базовой модели (осциллограф С1-45), могут работать с аналого-цифровым преобразователем 60АЦП-1 (блок цифрового отсчета) или без него и в зависимости от вставных блоков имеют эквивалентную полосу пропускания 1000, 2000, 5000, 10000 МГц.

Еще одним способом унификации и стандартизации ЭИА является применение новой унифицированной «безфутлярной» конструкции, изображенной на рис. 1.14, где показаны футляры прибора устаревшей и современной конструкции.

В старом варианте конструкция прибора, смонтированная на вертикальном или чаще на горизонтальном шасси, помещалась в массивный металлический футляр, который имел направляющие для движения шасси, отверстия для доступа конвектирующего воздуха. К шасси крепилась передняя лицевая панель, на которой распо-

лагались индикаторы и ручки органов управления. В качестве покрытий применялись муаровые лаки, явившиеся причиной запыленности приборов. Такая конструкция прибора была весьма металлоемка и не технологична.

В конструкции футляра нового типа отсутствует футляр, так как панели и планки крепятся к несущим кронштейнам. Конструкция нового футляра обеспечивает максимальную взаимозаменяемость, стилевое единство, малую металлоемкость, малую трудоемкость, возможность механизации изготовления и возможность изготовления 20 модификаций. Конструкция максимально облегчена. В качестве покрытий используется шагреневая эмаль. Такая конструкция прибора дает возможность агрегатировать приборы в измерительные системы и комплексы.

Трудоемкость производства прибора определяется затратами труда рабочих, принимавших участие в изготовлении продукции.

Трудоемкость изготовления одной детали зависит от сложности ее формы и требований к точности изготовления. Сложность формы деталей требует увеличения числа технологических операций, что влечет за собой повышение трудоемкости. С повышением требований к точности размеров, т. е. с уменьшением допусков, усложняется технологический процесс, так как число операций увеличивается, повышаются требования к конструкции инструмента и сокращается допустимая степень износа. Появляется необходимость более тщательного контроля деталей, что приводит к дополнительному повышению трудоемкости производства.

Проблема допусков для ЭИА является весьма важной, так как она определяет два важнейших свойства: эксплуатационную надежность и технологичность. Подробнее связь эксплуатационной надежности с допусками будет рассмотрена далее. Здесь же рассмотрим кратко основную суть проблемы допусков.

Проблема допусков в настоящее время является предметом глубоких теоретических и экспериментальных исследований [18, 19]. Определение допуска на параметр предусматривает такие установленные опытным либо расчетным путем границы для значений параметра прибора, при которых прибор способен выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показа-

тели в течение требуемого времени при определенных условиях.

Допуски классифицируются следующим образом:

— *производственный допуск*  $\delta_{\text{п}}$ , установленный производственно-технологической документацией для параметров приборов в процессе изготовления;

— *эксплуатационный допуск*  $\delta_{\text{э}}$ , установленный эксплуатационной документацией для параметров прибора в условиях эксплуатации;

— *ремонтный допуск*  $\delta_{\text{р}}$ , установленный техническими условиями на ремонт или другими документами для параметра ремонтируемого прибора.

Указанные допуска связаны соотношением

$$\delta_{\text{п}} > \delta_{\text{э}} > \delta_{\text{р}}. \quad (1.10)$$

В ГОСТ 9763-67 оговорено значение производственного допуска для приборов, выпускаемых предприятием-изготовителем, по основной погрешности. Допуск составляет 20% от указанной погрешности.

## 1.6. Испытания

Испытания электронной измерительной аппаратуры проводят для определения ее реальных особенностей и проверки выполнения заданных требований. Испытания должны проводиться на всех этапах создания аппаратуры. Если ограничиться испытаниями только в конце указанного процесса, то может обнаружиться, что реальные ее характеристики далеки от заданных. Чтобы исключить такую возможность, применяется целая система испытаний.

В процессе разработки, как мы видели ранее, существуют лабораторные, стендовые и государственные испытания.

При передаче в серийное производство существуют следующие виды испытаний:

— приемосдаточные, используемые при приемке изделий аппаратом ОТК или заказчиком;

— периодические, используемые в процессе серийного выпуска для определения соответствия изделий требованиям технических условий.

Все перечисленные виды испытаний различаются между собой только объемом.

Испытания проводят в соответствии с требованиями технических условий, в которых подробно изложены методы испытаний. Испытания проводятся в два этапа: 1) определяют основную погрешность в нормальных условиях; 2) определяют устойчивость прибора при воздействии различных факторов окружающей среды (тепло, холод, механические воздействия).

Нормальными условиями принято считать следующие:

- окружающая температура  $+20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , а для приборов высокой точности  $+20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ;
- относительная влажность  $65 \pm 15\%$  при температуре воздуха  $+20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ;
- атмосферное давление  $750 \pm 30$  мм рт. ст. ( $100 \pm 4$  кПа);
- напряжение питания сети 50 Гц  $220 \text{ В} \pm 2\%$ .

Основную погрешность определяют, сравнивая показания испытуемого прибора с показаниями образцового. Полученное значение алгебраической разности является основной погрешностью. Погрешность образцового прибора не превышает  $1/3$  допускаемой погрешности испытуемого прибора.

Иногда разработанный прибор таким испытаниям подвергнуть не удается из-за отсутствия образцовой аппаратуры. В этом случае методику и требуемую точность измерений согласуют с Госстандартом СССР.

Дополнительную погрешность определяют по изменению показаний либо испытуемого, либо образцового прибора при отклонении одного из влияющих факторов от нормального значения или за пределы нормальной области значений. Полученное изменение показаний принимают за дополнительную погрешность испытываемого прибора.

Испытания на воздействие внешней среды производят на специальном оборудовании (камерах, стенах). Климатические испытания включают: испытания на воздействие положительных температур (теплоустойчивость и теплопрочность), испытания на воздействие отрицательных температур (холодоустойчивость и холодаопрочность), испытания на воздействие влажности (влагоустойчивость, влагопрочность).

Для испытания приборы помещают в специальные камеры, температура либо влажность в которых поддерживается в области значений, заданных в ТУ. После

Таблица 1.8

Электронный вольтметр	Электронно-лучевой осциллограф	Измерительный генератор
<p>1. Основная погрешность по напряжению (на частотах 55, 400 Гц, 1,10, 100 кГц, 1,10, 100 и 1000 МГц)</p> <p>2. Влияние частоты, температуры, напряжения, формы кривой напряжения источника питания</p> <p>3. Смещение нестабильности электрического нуля</p> <p>4. Полное входное сопротивление</p> <p>5. Время установки показаний</p>	<p>1. Время нарастания переходной характеристики</p> <p>2. Величина выброса на переходной характеристике</p> <p>3. Завал вершины импульса</p> <p>4. Чувствительность</p> <p>5. Полоса пропускания</p> <p>6. Нелинейность амплитудной характеристики</p> <p>7. Нелинейность развертки</p> <p>8. Неравномерность вершины импульса</p> <p>9. Размытость изображения и расфокусировка</p> <p>10. Погрешность измерения амплитуды</p> <p>11. Погрешность измерения временных интервалов</p> <p>12. Входное сопротивление</p>	<p>1. Основная погрешность установки частоты (не менее чем на пяти точках)</p> <p>2. Дополнительная температурная погрешность частоты</p> <p>3. Нестабильность частоты</p> <p>4. Паразитная девиация частоты</p> <p>5. Основная погрешность установки опорного напряжения либо мощности</p> <p>6. Основная погрешность установки ослабления аттенюатора</p> <p>7. Нестабильность уровня выходного сигнала за любые 15 мин работы</p> <p>8. Коэффициент гармоник выходного сигнала</p> <p>9. Величина паразитной амплитудной модуляции</p> <p>10. Погрешность частоты внутреннего модулирующего источника</p> <p>11. Основная погрешность коэффициента глубины модуляции</p> <p>12. Погрешность частоты модуляции</p>

*Продолжение табл. 1.8*

Электронный вольтметр	Электронно-лучевой осциллограф	Измерительный генератор
	13. Минимальная частота следования развертки 14. Длительность непрерывных разверток 15. Величина регулируемой задержки развертки 16. Минимальная величина изображения исследуемого сигнала	13. Паразитная частотная модуляция в режиме амплитудной модуляции

извлечения из камеры прибора через определенное время, оговоренное методикой испытаний (обычно это время составляет 4 ч), измеряют его основные параметры. Подробно процедура испытаний приборов на устойчивость к климатическим воздействиям изложена в [9].

Механические испытания проводят для проверки устойчивости конструкции прибора к различным механическим воздействиям. Лабораторные электронные измерительные приборы подвергают испытаниям на вибропрочность и на прочность при транспортировании при температуре окружающей среды от +10 до +35°C и относительной влажности 80%.

Испытания на вибропрочность проводят на специальных вибrostендах. При этом прибор находится в том же положении, что и при эксплуатации. Испытания на прочность при транспортировании проводят на платформах специальных испытательных стендов. Порядок механических испытаний подробно описан в [9].

Основные параметры, контролируемые при испытаниях, для которых определяют основную и дополнительную погрешности электронных вольтметров, электронно-лучевых осциллографов и измерительных генераторов, приведены в табл. 1.8, данные которой могут дать представление об объеме, характере и специфике проводимых испытаний.

Конкретная методика испытаний приводится в ТУ на прибор. Число исследуемых параметров можно изменять

в соответствии со спецификой прибора. Из табл. 1.8 хорошо видно, насколько трудоемок процесс испытаний приборов, так как это связано с измерением значительного числа величин и непростыми требованиями метрологического обеспечения испытаний. Из таблицы видно, что понятие отказа для таких приборов, как электронно-лучевые осциллографы и измерительные генераторы, должно учитывать значительное число параметров, каждый из которых может выйти за пределы установленных допусков.

## 1.7. Тенденции конструирования

Рассмотрим, какие изменения произошли в конструкции приборов за прошедшие полтора десятилетия. За указанный промежуток времени сменилось два поколения приборов: на электронных лампах и на полупроводниковых приборах. В настоящее время разрабатываются, выпускаются и внедряются в производство приборы на интегральных микросхемах.

Решение проблем, связанных с внедрением новейших методов и средств измерений, приводит к существенным качественным и количественным изменениям самих приборов и требований, предъявляемых к ним. Например, создание сложных измерительных комплексов требует уменьшения габаритов и массы приборов, так как их компоновка становится затруднительной. В то же время усложнение функций приборов, повышение требований к ним приводит к возрастанию сложности (рис. 1.15).

Таким образом, возникает противоречие, которое можно разрешить, применяя принципиально новые методы конструирования. Основой новых методов конструирования является применение новой элементной базы. Только одно это мероприятие дало определенный эффект (рис. 1.16).

Появилась необходимость использования печатного монтажа как одного из средств уменьшения габаритов аппаратуры, повышения технологичности ее изготовления, улучшения ремонтопригодности, надежности и т. д. Снизилась металлоемкость приборов, так как началось массовое применение миниатюрных деталей.

Следующий этап развития миниатюризации — применение микромодулей в качестве элемента конструкции

приборов. И хотя микромодульное направление позволяет получать значительную плотность компоновки деталей (в среднем 10 деталей в 1 см<sup>3</sup>), существенного развития в конструировании приборов оно не получило из-за следующих причин, затрудняющих создание микромодульных схем:

- работа схемы при малых уровнях сигналов требует значительного экранирования;
- малые напряжения требуют больших развязок в выходных цепях;

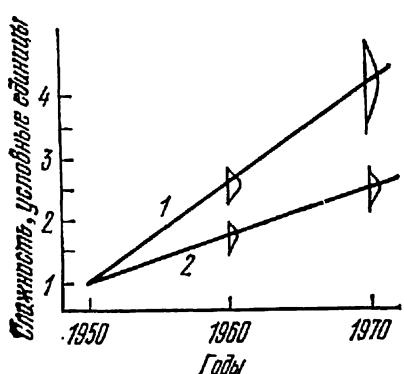


Рис. 1.15. График, характеризующий тенденцию роста сложности ЭИА:

1 — электронный осциллограф; 2 — электронный вольтметр.

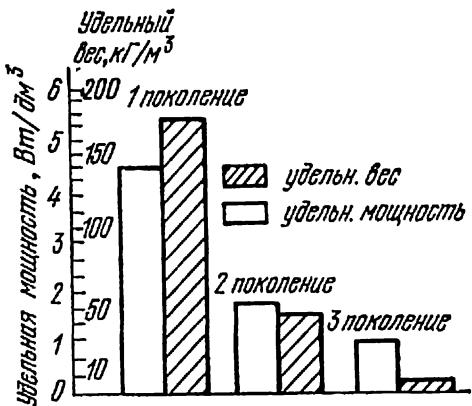


Рис. 1.16. Сравнение величин удельной мощности рассеивания и удельного веса различных поколений ЭИА.

— большая плотность монтажа требует эффективного отвода тепла;

— создание микромодулей в СВЧ диапазоне встречает ряд трудностей и т. д.

Качественно новым решением явилось конструирование приборов методом комплексной микроминиатюризации. При данном методе в качестве элементной базы применяются не микромодули, а микросхемы, которые обеспечивают большее уменьшение массы, габаритов и потребляемой мощности приборов, резко повышают надежность аппаратуры.

Существует, однако, предел в уменьшении массы и габаритов приборов общего назначения, обусловленный тем, что размеры органов управления и индикаторных устройств не могут быть уменьшены из соображений антропометрического и психофизиологического по-

рядка (конечно, это не относится к системам автоматического действия).

Вопросы микроминиатюризации радиоэлектронной аппаратуры достаточно подробно описаны в специальной литературе [20, 36].

В перспективе конструирование приборов будет производиться «рядами» или комплексами. В настоящий момент это является одним из основных направлений конструирования ЭИА. Стандартизация и унификация приборов, создание унифицированных функциональных узлов существенно повысят эффективность процесса разработки благодаря сокращению номенклатуры разработки приборов, укрупнению опытно-конструкторских работ (разрабатывают сразу «ряд» приборов с конструктивной преемственностью и унификацией внутри «ряда»).

Проектирование «рядами» существенно повысит и эффективность производства, так как уменьшится трудоемкость, уменьшится число собственных деталей, что приведет к сокращению числа единиц специальной оснастки и в конечном счете даст существенный выигрыш в трудоемкости и металлоемкости прибора. Появится возможность увеличить серийность приборов и тем самым удовлетворить потребности страны в новейших средствах измерений.

Создание «рядов» приборов потребовало разработки новой типовой конструкции корпуса, которая состоит из стандартизованных деталей. Основной размер ширины передней панели 480 мм, глубины корпуса 420 мм. Высота корпуса изменяется от 60 до 120 мм. Такой корпус создает определенные удобства в эксплуатации, так как он дает возможность устанавливать все приборы свободно (друг на друга) на рабочем месте или размещать их на приборной тележке либо в приборном шкафу. Прибор с таким корпусом имеет красивый внешний вид и достаточную механическую прочность.

В последние годы особое значение приобрели работы по автоматизации процесса измерений и агрегированию приборов. Полупроводниковая техника, новые СВЧ приборы и особенно комплексная микроминиатюризация позволяют автоматизировать отдельные приборы, создавать автоматизированные измерительные системы, в том числе системы, использующие ЭВМ для управления процессом измерения или обработки результатов [33, 37].

Автоматизация и агрегатирование будут основными направлениями работ в ближайшем будущем. Агрегатирование предусматривает построение агрегированных измерительных комплексов и систем из приборов (блоков), имеющих самостоятельное значение. Для создания комплексов и систем понадобятся приборы, построенные в основном на использовании дискретной (цифровой) информации, способные управляться дискретным цифровым сигналом.

Дискретная техника, создаваемая на основе изделий микроэлектроники, имеет большие потенциальные возможности для построения приборов с высокой надежностью.

Процесс обеспечения надежности — это, по существу, тот же процесс конструирования, но с определенной целенаправленностью, с определенными задачами, которые в большинстве случаев сводятся к нахождению оптимума какой-либо характеристики прибора, а в ряде случаев и технического компромисса между высокими требованиями к техническим характеристикам и высокими значениями надежности.

Всесторонний учет эксплуатационных особенностей всегда поможет инженеру по надежности правильно сформулировать требования к прибору и оказать максимальную помощь главному конструктору разработки в их реализации.

Знание условий проектирования, производства и эксплуатации даст, наконец, инженеру по надежности возможность правильно организовать сбор и анализ статистических данных, необходимых для оценки отдельных составляющих надежности.

## 2. НОРМИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭИА НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.

### 2.1. Виды отказов ЭИА

Ранее были рассмотрены основные особенности ЭИА, из которых следует, что она является аппаратурой многоразового действия, периодически профилактируемой и поверяемой (с изъятием из обращения) и обслуживаемой квалифицированным персоналом. Отказы ЭИА можно классифицировать по характеру их проявления,

обнаружения, степени влияния и времени существования.

1. По характеру проявления:

— внезапный — отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких основных параметров прибора;

— постепенный — отказ, характеризующийся постепенным изменением значений одного или нескольких основных параметров прибора.

2. По характеру обнаружения:

— явный — отказ, о возникновении которого можно судить сразу же после его проявления по одному либо нескольким признакам поведения аппаратуры;

— неявный (скрытый) — отказ, который, как правило, может быть обнаружен при помощи специальных измерений, проводимых либо при контроле функционирования, либо при периодических поверках.

3. По степени влияния на работоспособность:

— полный — отказ, в результате которого прибор находится в состоянии полной неработоспособности по одному из основных параметров;

— частичный — отказ, в результате которого прибор находится в состоянии неработоспособности по одному из вспомогательных параметров.

4. По времени существования:

— устойчивый — отказ, в результате которого произошло необратимое изменение какого-либо параметра прибора;

— перемежающийся — отказ, многократно возникающий, самоустраниющийся отказ одного и того же характера, приводящий к кратковременной утрате работоспособности.

Рассмотрим более подробно первые две классификации отказов. Деление отказов на внезапные и постепенные условно, так как внезапным отказам предшествуют некоторые постепенные скрытые изменения, приводящие к лавинообразному изменению параметра прибора, узла, элемента. Примеры внезапных отказов: пробой конденсатора фильтра источника питания, в результате чего выходит из строя выпрямитель прибора, перегорание сопротивления в мостиковой схеме детектора, из-за чего прибор не дает показаний и т. д.

Физическая сущность постепенных отказов заключается в том, что с течением времени под воздействием

внешних факторов происходят медленные необратимые физико-химические изменения в структуре элементов, приводящие к непрерывным изменениям одного или нескольких основных параметров. Структурные изменения (старение) могут происходить с различными скоростями, которые зависят как от внешних условий, так и от причин внутреннего характера, обусловленных индивидуальными особенностями отдельных радиоэлементов. Постепенные отказы проявляются в ЭИА в виде постепенного изменения ее выходных параметров, например ухудшения чувствительности усилителя электронного вольтметра, увеличения погрешности в измерении амплитуды осциллографом и т. д.

Методы расчета надежности с учетом внезапных отказов достаточно хорошо разработаны и апробированы во многих отраслях. Расчеты надежности, основанные на учете постепенных отказов применительно к радиоэлектронной аппаратуре и, в частности, к ЭИА разработаны слабо и практически еще не апробированы.

Соотношение между числом постепенных и внезапных отказов определяется особенностями прибора, его элементами, допусками на выходной параметра, качеством отработки принципиальной электрической схемы, влиянием окружающих условий. Такое обилие влияющих факторов не дает права утверждать, что в хорошо спроектированном приборе постепенных отказов быть не должно. Практика, например, показывает, что применительно к приборам 1-го поколения доля постепенных отказов от общего числа всех отказов лежит в пределах 0,3—0,6, не изменяясь во времени. Одной из эффективных мер уменьшения числа постепенных отказов является введение системы производственно-эксплуатационных допусков. Постепенные отказы можно прогнозировать [22].

Практический смысл деления отказов на явные и неявные для ЭИА заключен в важности установления срока соответствия ее параметров требованиям ТУ. Как видно из определения, о возникновении явных отказов можно судить сразу же после их проявления по одному, либо нескольким внешним признакам поведения прибора. Внешние признаки отказов могут быть самыми разнообразными, например: полное прекращение работы всей аппаратуры и ее отдельных узлов, аномальная работа отдельных узлов или блоков (искажения сигналов,

прекращение управления ими, самовозбуждение каскадов и т. д.), сильный нагрев деталей, искрение, вспышки, яркое свечение ЭВП, дым, запах горелых изоляционных материалов и покрытий, перегорание предохранителей и т. д.

Примерами неявных отказов являются искажения формы сигнала, даваемого измерительным генератором при отсутствии в самом генераторе осциллографической трубки либо встроенного прибора, измеряющего коэффициент нелинейных искажений, погрешность в калибровке электронного вольтметра, погрешность в измерении осциллографом временных интервалов. Явные отказы, кроме того, удобно подразделять на явные отказы 1-го и 2-го рода.

К явным отказам 1-го рода следует отнести такие, которые обусловлены чисто внешними признаками не нормальной работы прибора (дым, искрение и т. д.). К явным отказам 2-го рода отнесем те, которые обнаруживаются только индикаторами прибора (стрелочным прибором, цифровым табло, осциллографической трубкой). Деление явных отказов на отказы 1-го и 2-го рода также условно. В качестве примеров явных отказов 2-го рода следует указать следующие:

- а) в электронных вольтметрах — отсутствие показаний стрелочного прибора, зашкаливание стрелки, неустойчивые показания, дребезжание стрелки и т. д.;
- б) в электронно-лучевых осциллографах — пропадание либо плохая управляемость луча, нарушение синхронизации, резкое снижение чувствительности, искажения формы сигналов внутренней калибровки;
- в) в измерительных генераторах — отсутствие выходного уровня по показаниям стрелочного прибора, отсутствие показаний при измерении глубины модуляции, зашкаливание и т. д.

Рассмотрим, какой смысл имеет деление явных отказов на отказы 1-го и 2-го рода. Нетрудно заметить, что отказы 1-го рода по своему характеру больше всего относятся к отказам внезапным, так как они проявляются так же, как внезапные. Надежность с учетом отказов 1-го рода легко поддается расчету, однако подобные виды отказов не поддаются прогнозированию. Явные отказы 2-го рода могут происходить из-за внезапных и постепенных изменений параметров элементов, следовательно, эти отказы можно прогнозировать.

Кроме того, важно отметить, что явные отказы 2-го рода это, по существу, неявные отказы, переведенные в разряд явных с помощью имеющихся рабочих индикаторов прибора. Увеличивая число индикаторов, можно, в принципе, перевести все неявные отказы в разряд явных отказов 2-го рода.

Соотношение между явными и неявными отказами можно оценить с помощью коэффициента

$$K_{\text{н}} = n_{\text{н}} / n_0 = \lambda_{\text{н}} / \lambda_0, \quad (2.1)$$

где  $n_{\text{н}}$ ,  $n_0$  — число неявных и общих отказов соответственно;  $\lambda_{\text{н}}$ ,  $\lambda_0$  — интенсивность неявных и общих отказов соответственно. Величина  $K_{\text{н}}$  лежит в пределах

$$0 \leq K_{\text{н}} < 1. \quad (2.2)$$

Равенству  $K_{\text{н}}=0$  соответствует случай, когда любой выход параметра прибора за пределы установленных допусков обнаруживается с помощью либо рабочих, либо встроенных индикаторных устройств. Наличие явных отказов 1-го рода исключает равенство  $K_{\text{н}}$  единице. Значения  $K_{\text{н}}$  для ЭИА 1-го поколения следующие:

Электронный вольтметр . . . . .	0,18—0,25
Электронно-лучевой осциллограф	0,07—0,1
Измерительный генератор .	0,25—0,35

## 2.2. Показатели надежности

В процессе эксплуатации электронная измерительная аппаратура может находиться в одном из следующих состояний:

- а) использование по назначению в исправном состоянии;
- б) использование по назначению, но в состоянии неявного отказа;
- в) поиск и локализация места неисправности (явный отказ);
- г) проведение регламентных работ, не связанных с ее функционированием (аппаратура выключена);
- д) проведение периодических проверок (аппаратура включена);
- е) поиск и устранение отказов, обнаруженных после периодических поверок (неявный отказ);
- ж) временное хранение.

Основным состоянием ЭИА в процессе ее эксплуатации является состояние «а», состояние «б» нежелатель-

но; остальные состояния служат для того, чтобы обеспечить требуемую длительность состояния «а».

Перейдем к выбору показателей надежности ЭИА, необходимых для решения следующих вопросов:

1) формулировки требований вновь разрабатываемого прибора;

2) синтезирования аппаратуры с заданным уровнем надежности, т. е. расчета ее на заданную надежность;

3) определения необходимости в повышении надежности отдельных узлов, элементов и прибора в целом на различных этапах разработки, изготовления и эксплуатации;

4) оценки выполнения мероприятий по повышению надежности;

5) проведения сравнительного анализа различных приборов с точки зрения надежности в процессе проектирования;

6) оценки влияния прибора на надежность и эффективность системы (объекта), в которой он применяется;

7) расчета требуемого числа приборов для решения поставленной задачи в процессе эксплуатации;

8) планирования необходимых ремонтных и профилактических мероприятий;

9) выбора нужного с точки зрения надежности прибора для потребителя.

Показатели надежности должны отвечать следующим требованиям:

— должны иметь ясный физический смысл;

— должны быть обеспечены соответствующим инструментом для оценки в процессе разработки, производства и эксплуатации;

— должны отражать специфику аппаратуры, которую они характеризуют.

Выполнение ЭИА поставленных задач возможно в том случае, если аппаратура в момент ее включения находилась в исправном состоянии (отремонтирована либо прошла ремонтные работы) и в процессе определенного промежутка времени не потеряла работоспособности. В соответствии с этим в качестве обобщенного показателя надежности ЭИА целесообразно принять вероятность сложного события  $H$ , состоящего из двух событий:  $H_1$  — нахождения прибора в исправном состоянии,  $H_2$  — отсутствия в течение времени каких-либо отказов.

Событие  $H$  определяется произведением

$$H=H_1H_2. \quad (2.3)$$

Вероятность события  $H$  вычисляется на основе теоремы произведения вероятностей событий по формуле

$$P_H=K_r P_1(t), \quad (2.4)$$

где  $K_r$  — вероятность события  $H_1$ , известная под названием коэффициента готовности и вычисляемая по формуле

$$K_r=1/(1+t_p/T_{cp}), \quad (2.5)$$

$t_p$  — время, затрачиваемое на ремонт;  $P_1(t)$  — вероятность отсутствия отказов в течение времени  $t$ , для вычисления которой иногда используется формула

$$P_1(t)=e^{-t/T_{cp}} \quad (2.6)$$

Формула (2.4) является основным уравнением надежности ЭИА.

В ряде случаев для характеристики надежности можно использовать дополнительные показатели, которые характеризуют определенные частные свойства ЭИА с точки зрения надежности (коэффициент использования, среднее время ремонта, коэффициент неявных отказов и т. д.). Некоторые из них рассмотрены в настоящей книге как вспомогательные коэффициенты.

Некоторые авторы [22, 25, 32] предложили методы расчета надежности по постепенным отказам, однако из-за громоздкости вычислений они не нашли широкого применения в практике.

Для характеристики безотказности будем в дальнейшем пользоваться средним временем безотказной работы  $T_{cp}$ , нашедшим широкое применение из-за простоты его оценки [17, 21].

### 2.3. Источники информации о надежности ЭИА

К ранним стадиям проектирования ЭИА относится в первую очередь подготовительная — составление технического задания. На данной стадии формулируются все требования к прибору и выявляются возможности и пути их реализации. В соответствии с особенностями данного прибора должны быть изучены и сформулированы требования к его надежности.

Прибор должен превосходить имеющиеся прототипы

по техническим характеристикам и надежности, в противном случае нет необходимости в его создании. Следовательно, сразу же возникает двойная трудность. С одной стороны, предъявление повышенных требований к техническим характеристикам приводит к усложнению прибора и, следовательно, к снижению надежности, с другой — необходимо, чтобы в соответствии с требованиями технического прогресса надежность нового прибора была бы выше надежности прибора-прототипа.

Все это требует тщательного изучения существа вопроса на подготовительной стадии проектирования с подробным анализом количественных и качественных требований к надежности.

Какие вопросы должен уяснить специалист по надежности на данной стадии? Прежде всего, требует тщательного изучения количественная сторона вопроса. Речь идет о нормировании надежности, под которым понимается задание определенных количественных требований к выбранным показателям.

В настоящее время апробированного на практике строгого метода, по крайней мере по отношению к ЭИА, не существует.

Нормировать надежность по показателю среднего времени безотказной работы можно на основании реально достигнутого уровня надежности приборов-прототипов с учетом реальных темпов его повышения. Достигнутый уровень надежности можно оценить с помощью уравнения равнобочной гиперболы, хорошо аппроксимирующего зависимости между средним временем безотказной работы и числом элементов. Параметр равнобочной гиперболы и будет в данном случае показателем достигнутого уровня надежности (подробнее об этом см. в гл. 3). Для существующих приборов указанный параметр можно определить только лишь на основании статистических данных по материалам эксплуатации.

Рассмотрим подробно вопрос о методах и путях сбора статистических данных о надежности ЭИА. Как мы видели, основной особенностью ЭИА является то, что она используется массовым потребителем, причем на местах эксплуатации имеются специальные органы, которые ведают ее поверкой и ремонтом. Это создает весьма благоприятные условия для сбора обширных статистических данных непосредственно на местах эксплуатации. В этом отношении ЭИА имеет преимущество

перед другими видами электронной аппаратуры. Вопросам сбора данных о надежности и у нас, и за рубежом придается, как известно [23], большое значение на всех иерархических уровнях руководства. Любой руководитель должен подробно изучить материалы об отказах аппаратуры в обобщенном виде, для того чтобы выяснить, каковы причины возникших неудач и устраниены ли все трудности. Для уровня среднего и низшего звена — разработчиков отдельных блоков и приборов обязательны более подробные и детальные сведения, содержащие описания причин отказов каждого элемента и узла.

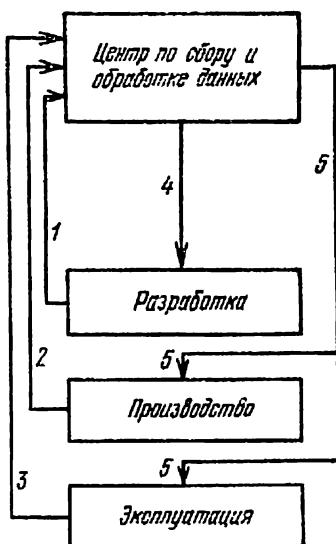


Рис. 2.1. Схема организации сбора данных о надежности.

Основными требованиями к системе организации сбора данных являются следующие:

- 1) сбор данных об изделии должен осуществляться в течение всей его жизни, начиная с момента проведения стендовых испытаний в процессе разработки;
- 2) данные, получаемые об ЭИА, должны быть достоверными, их должны оформлять и анализировать квалифицированные специалисты;
- 3) сбор данных должен охватывать единой системой всех потребителей и поставщиков;
- 4) система сбора данных должна допускать их автоматизированную обработку с помощью ЭВМ;
- 5) система сбора данных должна быть гибкой, т. е. такой, чтобы ее можно было расширять либо сокращать в зависимости от типа прибора;
- 6) система должна быть оперативной, т. е. она должна быстро давать ответы на все запросы и постоянно сохранять возможность непрерывной регистрации всех данных.

Схема организации сбора данных о надежности ЭИА изображена на рис. 2.1. В соответствии с принятой системой организации сбора данных предусмотрены следующие потоки информации:

1. Данные о структуре прибора, об элементной базе, о составе индикаторной системы, расчетной надежности,

режимах элементов, критичности разработанных узлов, принятых сроках поверки, принятом решении по конструкции, количестве узлов собственного изготовления, данные о технологичности и т. д.

2. Данные о применяемых технологических процессах, результатах входного контроля элементов, ритмичности производства, типовых испытаниях, данные о технологической приработке и результатах приемки приборов контрольным аппаратом.

3. Данные об условиях эксплуатации, о временном режиме работы, числе и характере отказов, об условиях, в каких отказ обнаружены, о способах и продолжительности его устранения, о результатах периодической поверки, о стоимости эксплуатации.

Таблица 2.1  
Сведения о результатах периодических поверок ЭИП

Наименование эксплуатирующей организации за 19 г.

№ п/п	Тип прибора	Год выпуска	Результаты поверки		Примечание
			соответствует ТУ	не соответствует ТУ (по какому параметру)	

4. Данные о достигнутой надежности по различным типам приборов-прототипов, обобщенные данные о времени, затрачиваемом на ремонт прибора, о результатах периодических поверок, о тенденциях в изменении указанных величин, экономические показатели, характеризующие достигнутый уровень надежности, данные о надежности элементов, узлов и отдельных схемных решений.

5. Рекомендации по повышению надежности отдельных приборов, выполняемые силами потребителей, данные о надежности, рекомендации по организации периодической поверки и регламентным работам.

В организации данной системы работы важным вопросом является вопрос о носителях информации, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

— содержать необходимый минимум сведений по существу вопроса;

— быть максимально простыми для их составления (заполнения), по возможности содержать ответы типа «да» и «нет»;

## Картоточка отказа

- да     - нет

<b>I. Данные о приборе</b>								
1. Тип прибора	2. Заводской номер	3. Дата выпуска	4. Дата ввода в эксплуатацию					
<b>II. Условия эксплуатации</b>								
1. Цеховые	<input type="checkbox"/>	2. Лабораторные	<input type="checkbox"/>	3. Портативные	<input type="checkbox"/>			
<b>III. Отказ обнаружен</b>				4. После эксплуатации				
1. При поступлении в эксплуатацию	<input type="checkbox"/>	2. Во время эксплуатации	<input type="checkbox"/>	3. При периодической проверке	<input type="checkbox"/>	5. После хранения	<input type="checkbox"/>	
<b>IV. Данные о наработке</b>				2. Наработка в часах с начала эксплуатации _____				
1. Дата предыдущего ремонта				3. Наработка в часах после предыдущего ремонта _____				
<b>V. Внешнее проявление отказа</b>								
1. Полная неработоспособность	<input type="checkbox"/>	2. Параметр _____ вне допуска	<input type="checkbox"/>					
(указать параметр)								
3. Не калибруется	<input type="checkbox"/>	4. Механическое повреждение	<input type="checkbox"/>	5. Сработавшие защитные устройства		<input type="checkbox"/>		
<b>VI.</b> Проявление отказа (что замечено)								
<b>VII. Причина отказа</b>								
Заполняется только один из п. 1-5 и п. 6-8								
1. Недостатки схемы	<input type="checkbox"/>	2. Недостатки конструкции	<input type="checkbox"/>	3. Недостатки изготовления				<input type="checkbox"/>
4. Недостатки эксплуатации	<input type="checkbox"/>	5. Недостатки элемента:		<input type="checkbox"/>	Параметр не в допуске			<input type="checkbox"/>
		полный отказ						
6. Отказавший блок,узел,деталь _____				7. Вид и схемный номер отказавшего элемента _____				
<b>8.</b> Причина отказа (что произошло)								
<b>VIII. Прочие неисправности</b>								
<b>VIII. Способ устранения отказа</b>								
1. Регулировка без замены элемента	<input type="checkbox"/>	2. Замена отказавшего элемента	<input type="checkbox"/>	3. Подбор элементов	<input type="checkbox"/>	4. Механическое восстановление		<input type="checkbox"/>
<b>IX. Ремонт произведен</b>								
1. Дата ремонта	2. Продолжительность ремонта	3. Квалификация ремонтника ( опыт работы - лет )	4. Изготовителем с рекомендацией					
		без рекламации		<input type="checkbox"/>	потребителем		<input type="checkbox"/>	

Картоточку заполнил

Проверил

Рис. 2.2. Картоточка отказа.

Лист оценки надежности прибора				
<i>Обозначение прибора</i>	<i>IV. Общее кол.-во элементов ..... шт.</i>	<i>VII. Кол.-во узлов собственного изготовления</i>	<i>XII. Срок службы _____ Тех. ресурс _____</i>	
<i>I. Наименование прибора</i>	<i>V. В том числе (0 %)</i>	<i>VIII. Коэффициент применяемости</i>	<i>XIII. <math>T_{ср}</math> расчет. _____</i>	
<i>II. Основные технические параметры</i>	<input type="checkbox"/> ЗВП <input type="checkbox"/> ПП <input type="checkbox"/> ИС <input type="checkbox"/> Р <input type="checkbox"/> С <input type="checkbox"/> Л	<i>IX. Предполагаемая серийность</i>	<i>XIV.</i>	
<i>1. 2. 3. 4. 5. 6.</i>		<i>X. Стоимость разработки</i>	<i>XV.</i>	
<i>III. ближайший прототип прибора</i>	<i>VI. Выбранный срок периодической проверки _____</i>	<i>XI. Стоимость прибора расчетная</i>		

Рис. 2.3. Лист оценки надежности.

Лист обеспечения надежности прибора				
<i>Обозначение прибора</i>	<i>Разработаны рекомендации</i>			
	<i>Типовые испытания</i>	<i>Оценочные испытания задано</i>	<i>Отм. о выполн.</i>	<i>Отм. о выполн.</i>
<i>1. Наименование прибора</i>	<i>Выдер-жал</i>	<i>Тср =</i> <i>Получено</i>	<i>Дата</i>	<i>Дата</i>
	<i>Не вы-держал</i>	<i>Тср =</i> <i>Отказы</i>	<i>Отм. о выполн.</i>	<i>Отм. о выполн.</i>
<i>2. Шифр прибора</i>	<i>Отказы</i>	<i>1.</i>	<i>1.</i>	<i>1.</i>
		<i>2.</i>	<i>2.</i>	<i>2.</i>
<i>3. Начало серийного выпуска</i>		<i>3.</i>	<i>3.</i>	<i>3.</i>
<i>4. Завод-изготовитель</i>	<i>3.</i>	<i>4.</i>	<i>4.</i>	<i>4.</i>
<i>5. Объем серийного выпуска (шт.)</i>	<i>4.</i>	<i>5.</i>		
<i>6. Продолжительность приработки</i>	<i>5.</i>	<i>6.</i>		
<i>7.</i>	<i>6.</i>	<i>7.</i>		
<i>8.</i>				

Рис. 2.4. Лист обеспечения надежности.

- быть удобными для кодирования;
- содержать ясные и четко поставленные вопросы.

Носителями информации, обслуживающими поток 3 (рис. 2.1) являются карточка отказа (рис. 2.2) и сведения о результатах периодических проверок ЭИП (табл. 2.1). Носителем информации, обслуживающим поток 1, является лист оценки надежности (рис. 2.3), а поток 2 — лист обеспечения надежности (рис. 2.4). Карточки отказа направляются в центр по сбору и обработке данных по мере их накопления. Прочие формы отчетности направляются периодически.

Описанная система является информационной. Сбор данных, а также принятие решения и управляющие воздействия осуществляются человеком, а обработка и анализ — ЭВМ.

Можно создать систему, в которой выдача управляющих воздействий будет осуществляться с помощью ЭВМ. Такая система будет носить название автоматизированной системы управления надежностью.

Вернемся к вопросу нормирования надежности. Накопленные описанным способом данные дают возможность получить с помощью карточки отказа и сведений о результатах периодической поверки ЭИП искомые данные о результатах испытаний и эксплуатации приборов-прототипов. Массив указанных данных обрабатывается, и определяется наиболее вероятное или среднее значение требуемого показателя ( $T_{ср}$ ,  $t_p$  или  $T_{пов}$ ). Метод весьма прост. Недостатком его является то, что он обладает невысокой точностью и не учитывает важных особенностей прибора, особенно его технических характеристик, и, кроме того, не учитывает перспективы в повышении надежности. В таком виде описанный метод выбора норм не эффективен. Существуют более точные методы, один из которых описан далее.

Иногда для решения задач оптимизации надежности необходимо установить зависимость между надежностью и стоимостью, которая является основным критерием эффективности ЭИА лабораторного типа. Известен метод нормирования под названием «метод оптимальной надежности».

Под оптимальной надежностью понимают такое значение надежности, которое соответствует минимальной стоимости суммарных затрат, т. е. затрат на производство и эксплуатацию изделия. Один из методов подробно описан в литературе [21].

## **2.4. Связь технических параметров с надежностью**

Вызывает интерес метод нормирования, основанный на использовании связи между техническими параметрами прибора, его основными конструктивными характеристиками и надежностью прибора. Этот метод удобен тем, что он позволяет обеспечить технический компромисс между параметрами прибора и его надежностью, что весьма удобно осуществить при составлении ТЗ на прибор. Метод основан на зависимости надежности аппаратуры от значительного числа факторов. Например, число применяемых элементов и режимы их использования в приборе в значительной мере определяют его надежность. Надежность зависит от допуска на прибор и от заданной точности измерений, при этом, чем шире допуска на выходной параметр, тем больше выражена тенденция к повышению надежности. Определенным образом влияют на надежность и такие характеристики прибора, как чувствительность, полоса пропускания, число поддиапазонов (шкал), стабильность основных параметров, так как повышение требований к техническим параметрам приводит к усложнению схемы прибора, а это, как правило, является источником частых отказов.

Определение характера такой связи и степени взаимозависимости указанных факторов даст возможность создать аппарат для оценки и нормирования технических параметров прибора с учетом надежности.

Задача формулируется следующим образом. Имеется ряд учитываемых признаков статистической совокупности, характеризующих технические параметры прибора и надежность. Необходимо исследовать корреляционную связь между указанными признаками, точнее, между одним признаком — надежностью и всеми остальными — техническими параметрами.

Подобные проблемы можно исследовать с помощью корреляционного анализа [26, 27], который решает следующие основные задачи.

**Первая задача.** При исследовании зависимости между функцией и каким-нибудь аргументом при наличии других посторонних воздействий, затушевывающих влияние аргумента, необходимо ответить на вопрос, как изменилась бы функция в связи с изменением одного из аргументов, если бы другие ее аргументы не изменились.

Причем эта задача решается в тех случаях, когда другие аргументы на самом деле изменяются и искажают интересующую нас зависимость.

**Вторая задача.** Определить степень искажающего влияния прочих факторов на интересующую нас зависимость или определить силу, с которой данная зависимость проявляется среди многообразия влияющих на нее воздействий.

Метод множественной корреляции дает решение указанных задач, а, следовательно, и поставленной задачи.

Таблица 2.2

Тип вольтметра	Тип схемы измерения	Пределы измерения, мВ—В	Диапазон частот, Гц—МГц	Основная погрешность, %	Входное сопротивление, МОм	Потребляемая мощность, Вт	Объем футляра, дм <sup>3</sup>	Сложность, шт.
В3-2А	Усилитель-детектор То же	10—300	20—1	±(2,5—6)	1	60	13	80
В3-4		10—100	40—30	±(2,5—12)	1	200	27	170

Рассмотрим решение данного вопроса применительно к электронным вольтметрам, которые наиболее всего распространены в лабораторных и цеховых условиях. При выборе учитываемых признаков — технических параметров — необходимо принимать во внимание следующие соображения:

- все технические параметры должны быть общими для выбранной группы электронных вольтметров;
- требования к техническим параметрам должны иметь конкретные численные выражения;
- между выбранными параметрами и надежностью должна существовать реальная связь, определяемая хотя бы логически.

Рассмотрим электронные вольтметры вида В3, применяемые для измерения переменных напряжений. Их можно разделить на три группы: вольтметры типа детектор-усилитель, усилитель-детектор, компенсационные вольтметры.

Для анализа и выбора технических параметров составляют таблицу, подобную табл. 2.2.

Как показывает практика эксплуатации, надежность электронных вольтметров определяется:

1. Сложностью — числом примененных комплектующих изделий электронной техники, с возрастанием кото-

рого при существующих принципах конструирования надежность уменьшается по гиперболическому закону [21].

2. Пределами измерения и, главным образом, нижним пределом измерения, так как чем меньше нижний предел измерения, тем большее усиление сигнала требуется для нормальной индикации. Повышение коэффициента усиления усилителя вызывает его усложнение и, следовательно, уменьшение надежности работы.

3. Числом шкал (пределов) измерения. Большое число шкал приводит к усложнению конструкции переключателя пределов измерений и схемы входных цепей, при этом возрастает количество корректирующих элементов. Все это приводит к снижению надежности.

4. Диапазоном частот, в котором данный электронный вольтметр осуществляет измерения. Чем выше частота, тем сложнее выполнить усилитель вольтметра, труднее осуществить равномерность его частотной характеристики, сложность его возрастает, а надежность уменьшается. Замечено, что надежность уменьшается также и при уменьшении нижнего предела частотного диапазона, начиная с 50 Гц.

5. Основной погрешностью измерения. Чем меньше допустимая погрешность измерения, тем надежность ниже, так как повышение точности неизбежно приводит к усложнению прибора, например, из-за применения стабилизаторов напряжения, систем калибрования и т. д.

При этом надо заметить, что погрешность измерения существенно зависит от частоты и сравнивать два вольтметра по данному параметру необходимо на какой-либо одной частоте.

6. Удельной мощностью рассеивания, характеризуемой электрической мощностью, рассеиваемой в 1 дм<sup>3</sup> прибора.

Чем больше мощность рассеивания, тем выше температура прибора, а это, как известно, приводит к возрастианию частоты отказов радиоэлементов. Удельная мощность определяется как мощность, потребляемая прибором и отнесенная к единице объема, например к 1 дм<sup>3</sup>.

Электронные вольтметры характеризуются еще и входным импедансом, однако данный параметр имеет весьма слабую связь с надежностью и определяется в основном схемой входных цепей.

Представляется возможным в качестве основных параметров — учитываемых признаков статистической со-

вокупности выбрать следующие:  $x_1$  — обобщенный показатель надежности ( $P_{\text{п}}$ );  $x_2$  — нижняя,  $x_3$  — верхняя частоты диапазона;  $x_4$  — чувствительность прибора — величина, обратная нижнему пределу измерения;  $x_5$  — число шкал;  $x_6$  — погрешность на частоте 1 кГц;  $x_7$  — удельная мощность рассеивания;  $x_8$  — сложность (число радиоэлементов).

Таблица 2.3

Тип вольтметра	$P_{\text{п}}$	Диапазон частот		Чувствительность, 1/мВ	Число шкал	Погрешность на частоте 1 кГц	Удельная мощность рассеивания, Вт/дм <sup>3</sup>	Сложность, шт.
		нижняя частота, Гц	верхняя частота, МГц					
B3-2A	0,72	20	1	0,1	10	2,5	4,5	80
B3-3	0,73	30	10	0,1	5	4	5,3	110
B3-4	0,64	40	30	0,1	5	2,5	6,5	170
B3-4	0,52	20	1	20	12	4	3,9	140
B3-6	0,60	5	1	2	18	6	4,3	170
B3-7	0,61	20	0,2	1	12	1,5	3,2	180
B3-9	0,70	20	300	0,05	1	0,5	4,1	40
B3-12	0,66	100	300	0,1	6	4	2,9	137
BK-13	0,72	20	1	0,3	10	4	4,9	87
B3-14	0,75	30	10	0,3	6	4	3,1	153

Сведем данные в табл. 2.3 (значения величин  $P_{\text{п}}$  и удельной мощности рассеивания условные). Примем допущение о линейной зависимости между учитываемыми признаками, так как высокая точность расчета здесь не нужна. Тогда можно утверждать, что для исследуемого случая правомерно использовать прямолинейную множественную регрессию.

Уравнение прямолинейной множественной регрессии  $p$  переменных имеет следующий вид:

$$\bar{x}_{1, 2, 3, \dots, p} = b_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_p x_p, \quad (2.7)$$

где  $\bar{x}_{1, 2, 3, \dots, p}$  — среднее значение функции  $x_1$ , соответствующее заданным значениям аргументов  $x_2, x_3, \dots, x_p$ .

При расчете параметров все переменные и соотношения между ними будем выражать в стандартизированном масштабе. За начало отсчета принимается значение средней арифметической, а за единицу измерения — величина среднеквадратического отклонения.

Формула перевода переменного в стандартизованный масштаб имеет вид

$$t_x = (x - \bar{x}) / \sigma_x, \quad (2.8)$$

где  $\bar{x}$  — значение признака в натуральном масштабе;  $t_x$  — соответствующее значение в стандартизованном масштабе;  $\sigma_x$  — среднеквадратическое отклонение.

Коэффициент корреляции между стандартизованными переменными выражается формулой

$$r_{xy} = \frac{t_x t_y}{n_h}, \quad (2.9)$$

где  $n_h$  — число наблюдений.

Указанный коэффициент корреляции равен коэффициенту корреляции между учитываемыми признаками ( $i, j$ ), его значения сведем в табл. 2.4.

Таблица 2.4

<i>j</i>	<i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	0,09	0,12	-0,74	-0,59	-0,15	0,11	-0,41
2	0,09	+	0,61	-0,185	-0,41	0,04	-0,26	0,06
3	0,12	0,61	+	-0,22	-0,59	-0,36	-0,32	-0,45
4	-0,74	-0,185	-0,22	+	0,39	0,2	-0,135	0,16
5	-0,55	-0,41	-0,59	0,39	+	0,57	-0,15	0,49
6	-0,15	0,04	-0,36	0,2	0,57	+	-0,02	0,39
7	0,11	-0,26	-0,32	0,135	-0,15	-0,02	+	0,08
8	-0,51	0,06	-0,45	0,16	0,49	0,39	-0,08	+

Уравнение множественной прямолинейной регрессии в стандартизованном масштабе имеет вид

$$\bar{t}_{1, 2, 3, \dots, p} = \beta_2 t_2 + \beta_3 t_3 + \dots + \beta_p t_p, \quad (2.10)$$

где  $t_2, t_3, \dots, t_p$  — стандартизованные значения переменных;  $\bar{t}_{1, 2, 3, \dots, p}$  — среднее значение стандартизированной переменной  $t_1$  соответствующее заданным значениям переменных;  $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_p$  — стандартизованные коэффициенты множественной регрессии, которые находятся из условия

$$\Sigma [t_1 - \bar{t}_{1, 2, 3, \dots, p}]^2 = \min. \quad (2.11)$$

Взяв частные производные от левой части по  $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_p$  и приравняв их нулю, получим следующую систему нормальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} r_{12} &= \beta_2 + \beta_3 r_{32} + \beta_4 r_{42} + \dots + \beta_p r_{p2} \\ r_{13} &= \beta_2 r_{32} + \beta_3 + \beta_4 r_{43} + \dots + \beta_p r_{p3} \\ r_{1p} &= \beta_2 r_{2p} + \beta_3 r_{3p} + \beta_4 r_{4p} + \dots + \beta_p \end{aligned} \right\}. \quad (2.12)$$

Используя данные табл. 2.4, запишем систему нормальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 0,09 &= \beta_2 + 0,61\beta_3 - 0,185\beta_4 - 0,415\beta_5 + \\ &\quad + 0,04\beta_6 - 0,26\beta_7 + 0,06\beta_8 \\ 0,12 &= 0,61\beta_2 + \beta_3 - 0,22\beta_4 - 0,59\beta_5 - \\ &\quad - 0,36\beta_6 - 0,32\beta_7 - 0,45\beta_8 \\ -0,74 &= -0,185\beta_2 - 0,22\beta_3 + \beta_4 + 0,39\beta_5 + \\ &\quad + 0,2\beta_6 - 0,135\beta_7 + 0,16\beta_8 \\ -0,55 &= 0,415\beta_2 - 0,59\beta_3 + 0,39\beta_4 + \beta_5 + \\ &\quad + 0,57\beta_6 - 0,15\beta_7 + 0,49\beta_8 \\ -0,15 &= 0,04\beta_2 - 0,36\beta_3 + 0,2\beta_4 + 0,57\beta_5 + \\ &\quad + \beta_6 - 0,02\beta_7 + 0,39\beta_8 \\ 0,11 &= -0,26\beta_2 - 0,32\beta_3 - 0,135\beta_4 - 0,15\beta_5 - \\ &\quad - 0,02\beta_6 + \beta_7 - 0,08\beta_8 \\ -0,51 &= 0,06\beta_2 - 0,45\beta_3 + 0,16\beta_4 + \\ &\quad + 0,49\beta_5 + 0,39\beta_6 + 0,08\beta_7 + \beta_8 \end{aligned} \right\}. \quad (2.13)$$

Систему нормальных уравнений решаем методом последующего исключения неизвестных. Проверка осуществляется подстановкой. Полученные таким путем значения коэффициентов равны

$$\begin{aligned} \beta_2 &= 0,05, \quad \beta_3 = -0,64, \quad \beta_4 = -0,65, \\ \beta_5 &= -0,6, \quad \beta_6 = 0,3, \quad \beta_7 = -0,3, \quad \beta_8 = -0,54. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Полученные значения коэффициентов  $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_8$  показывают, на какую часть сигмы изменилось бы среднее значение функции, если бы существующий аргумент увеличился на сигму, а прочие аргументы остались бы без изменений. Следовательно, они выражают скорость изменения среднего значения функции по каждому из аргументов при постоянных значениях прочих ар-

гументов. Поскольку все переменные выражены в сравнимых единицах измерения (сигмах), то коэффициенты  $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_8$  показывают сравнительную силу влияния изменения переменной на изменение функционального признака.

Для рассматриваемого случая, описанного данными табл. 2.4, уравнение множественной регрессии в стандартизованном масштабе имеет вид

$$P_{\text{п}} = 0,05t_2 - 0,64t_3 - 0,65t_4 - 0,6t_5 + 0,3t_6 - \\ - 0,3t_7 - 0,54t_8. \quad (2.15)$$

При практических расчетах удобнее иметь дело с уравнением множественной регрессии в натуральном масштабе. Для получения коэффициентов данного уравнения воспользуемся формулой

$$b_i = \beta_i \sigma_i / \sigma_i, \quad (2.16)$$

$$b_i = \bar{x}_i - b_2 \bar{x}_2 - b_3 \bar{x}_3 - \dots - b_p \bar{x}_p, \quad (2.17)$$

где  $\bar{x}_i$  и  $\sigma_i$  — соответственно среднеарифметическое и среднеквадратическое соответствующих признаков.

Результаты расчета  $\bar{x}_i$  и  $\sigma_i$  сведем в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Характеристики, параметры	$x_i$	$\sigma_i$
Обобщенный показатель $P_{\text{п}}$	0,665	0,07
Нижняя частота	30,5	24,7
Верхняя частота	65,4	117,6
Чувствительность	2,4	5,9
Число шкал	8,6	4,7
Погрешность на частоте 1 кГц	3,3	1,5
Удельная мощность рассеивания	4,3	1,05
Сложность	126	43,6

Коэффициенты  $b_i$ , определенные по формулам (2.16) и (2.17), равны

$$b_1 = 0,93, \quad b_2 = 0,0014, \quad b_3 = -0,0038, \quad b_4 = -0,076, \quad b_5 = \\ = -0,088, \quad b_6 = 0,14, \quad b_7 = -0,2, \quad b_8 = -0,0085.$$

Окончательное уравнение множественной регрессии для электронных вольтметров, связывающее значение  $P_{\text{п}}$  с учетываемыми признаками совокупности в натуральном масштабе

$$P_{\text{п}} = 0,93 + 0,0014x_2 - 0,0038x_3 - 0,076x_4 - 0,088x_5 + \\ + 0,14x_6 - 0,2x_7 - 0,0085x_8. \quad (2.18)$$

Проверим, насколько указанное уравнение удовлетворяет поставленной задаче. Для этого проведем расчет по этому уравнению и сопоставим его результаты с данными, приведенными выше. Сведем результаты расчета в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Тип прибора	Статистическое значение	Расчетное значение по уравнению (2.18)	Погрешность, %
B3-2A	0,72	0,704	2
B3-3	0,73	0,737	0,95
B3-4	0,64	0,646	0,93
B3-5	0,52	0,529	1,7
B3-6	0,60	0,611	1,55
B3-7	0,61	0,618	1,3
B3-9	0,70	0,700	0
B3-12	0,66	0,645	2,3

Как видно из результатов, приведенных в табл. 2.6, погрешность расчета величины  $P_{\pi}$  не превышает 3%. Это указывает на достаточную точность расчетов и подтверждает правильность предположений о примерной линейности парных зависимостей между учитываемыми признаками.

Уравнение множественной регрессии в стандартизованном масштабе (2.15) дает ответ на весьма важный вопрос: каково влияние различных технических параметров на надежность устройства и какова теснота связи между данными параметрами.

Из уравнения (2.15) видно также, что в рассматриваемом случае на величину надежности наибольшее влияние оказывают верхняя частота диапазона, чувствительность прибора и число шкал. Например, с увеличением верхней частоты диапазона на одну сигму (при неизменных значениях прочих параметров) величина  $P_{\pi}$  уменьшится в среднем на 0,5 сигмы, в то время как при изменении нижней частоты диапазона на одну сигму  $P_{\pi}$  изменится на 0,05 сигмы.

Укажем также на сильную связь между надежностью и чувствительностью тракта измерения сигнала, а также между надежностью и сложностью прибора. Прочие параметры влияют на надежность не столь сильно. Сопоставление величин  $\beta_1 \beta_3 \beta_5 \dots \beta_8$  с соответствующими ко-

эффективентами корреляции  $r_{12}r_{13}\dots r_{18}$  подтверждает, кроме того, наличие искажающего влияния одного признака на другой, и поэтому значения коэффициента корреляции несколько отличны от значений соответствующих  $\beta_i$ .

В рассматриваемом случае, например, искаженными оказались коэффициенты корреляции:  $r_{13}$ , характеризующий связь между надежностью и верхней частотой диапазона,  $r_{16}$ , характеризующий связь между надежностью и погрешностью. В первом случае искажающее влияние оказала тесная связь между признаками  $x_2$  и  $x_3$  — верхней и нижней частотой диапазона, во втором — между признаками  $x_5$  и  $x_6$  — числом шкал и погрешностью. Такие связи реально существуют.

Совокупное влияние всех рассмотренных учитываемых признаков на надежность определяется коэффициентом множественной корреляции

$$R_{1,2,\dots,p} = \sqrt{\beta_2 r_{12} + \beta_3 r_{13} + \dots + \beta_p r_{1p}}. \quad (2.19)$$

Рассчитанные по данной формуле величины показывают, что признаки-аргументы более чем на 98% для нашего случая определяют величину признака-функции.

Таков метод нормирования, связывающий надежность с техническими параметрами прибора.

Для окончательного суждения о возможностях данного метода рассмотрим его недостатки.

1. Уравнение (2.19) учитывает свойства тех приборов, для которых оно получено. Расчет надежности приборов, имеющих более перспективные элементную базу и конструктивные решения, дает большую погрешность.

2. Возможности метода ограничены необходимостью базироваться на однотипных, имеющих сходные выходные параметры приборах. Это обусловлено выбором учитываемых признаков, одинаково характеризующих выбранные приборы. Так, например, для приборов В3 удалось найти более четырех учитываемых признаков, для приборов С1 этого сделать не удалось из-за имеющихся значительных различий между типами приборов. Аналогична картина и с измерительными генераторами.

Преодолеть эти два недостатка можно следующим путем. Первый недостаток можно свести к минимуму, если предположить, что характер и теснота корреляционной связи между надежностью и техническими параметрами существенно не изменяется. Иными словами, это

означает, что если бы рассматриваемые приборы были созданы на новых радиоэлементах, обладающих более высокой надежностью, и основаны на новых принципах конструирования и испытаний, то изменился бы лишь только общий уровень надежности, оцениваемый коэффициентом  $b_1$ , а коэффициенты  $b_2, b_3, \dots, b_p$  существенно бы не изменились. Тогда задача может быть решена следующим образом. На основании анализа данных о надежности радиоэлементов и приборов за предыдущие годы изучается тенденция изменения надежности. Затем строится зависимость  $b_1 = b_1(t)$ , которая экстраполируется на ряд значений в перспективе. Второй недостаток можно свести к минимуму только в том случае, если для анализа выбрать ряд приборов, однотипных по своим схемно-конструктивным особенностям.

Итак с помощью рассмотренного выше метода представляется возможным нормировать надежность электронных измерительных приборов с точностью, достаточной для ранних стадий проектирования. Такой метод по существу дает возможность определить минимально возможный уровень надежности, исходя из конструктивно-технологических возможностей промышленности.

### 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Как было показано ранее, на стадии согласования технического задания главный конструктор разработки формулирует основные требования к надежности прибора. Рассмотрим, как реализуются указанные требования на последующих стадиях проектирования.

#### 3.1. Эскизное проектирование

Основные задачи, которые решают на стадии эскизного проектирования, сводятся к выбору наилучших вариантов построения приборов и его отдельных узлов с уточнением основных технических характеристик, иными словами, главный конструктор разработки должен убедиться в том, что прибор может быть создан по предъявленным требованиям и наилучшим вариантом его соз-

дания является выбранный. Многочисленные требования к прибору, заложенные в ТЗ, как правило, значительно связаны между собой, поэтому главному конструктору разработки приходится часто прибегать к техническому компромиссу при решении возникающих вопросов.

Как видно из материала предыдущей главы, надежность существенно связана с каждым техническим параметром. Следовательно, при оценке и обеспечении надежности прибора необходим учет многих факторов, что заставляет пользоваться комплексным подходом.

Следует отметить, что в каждой отрасли техники используют свои специфические методы конструирования и обеспечения надежности. Так, например, для бортовых систем расчет конструкции производится с учетом максимальной надежности [28]. Как правило, эти системы обладают большой сложностью, поэтому конструктор системы практически не может также быть и специалистом по выбору и применению комплектующих изделий. Для этого в состав группы вводятся инженеры, специализирующиеся по транзисторам, интегральным микросхемам и другим элементам. Зачастую могут быть использованы и другие специалисты по различным частным вопросам конструирования: тепловым расчетам, методам испытаний, различным материалам и процессам и т. д.

При конструировании телевизионных приемников [11] основное внимание главного конструктора, коллектива которого не является столь многочисленным, направлено на улучшение внешнего вида, качества изображения и звука, снижение себестоимости и трудоемкости, совершенствование технологии, рассчитанной на крупносерийное производство. Внимание специалистов по надежности данного вида аппаратуры направлено на ликвидацию главным образом внезапных отказов и обеспечение ремонтопригодности, хотя она как параметр не оговаривается.

Специфика в конструировании электронной измерительной аппаратуры вытекает из ее особенностей. Специалист по надежности должен обеспечить необходимую величину безотказности по внезапным и постепенным отказам и ремонтопригодности. Рассмотрим, как это решается на стадии эскизного проекта.

Первым шагом специалиста по надежности, перед которым поставлены конкретные требования, вытекающие

из технического задания, является анализ статистических данных об отказах приборов, близких к разрабатываемому. При этом должны быть поставлены следующие вопросы, касающиеся прибора-прототипа:

- каков характер отказов, полученных в процессе обобщения эксплуатационных данных?
- какие узлы, элементы прибора являются источником наиболее частых отказов?
- какие параметры прибора критичны с точки зрения надежности?
- какие недостатки имелись в конструкции прибора?
- каковы другие причины, снижающие надежность приборов?

Анализ и обобщение указанных данных и должны послужить основой для составления программы работ по обеспечению надежности. Анализ отказов, проведенный на основании статистических данных, показывает, что электронным измерительным приборам присущи внезапные, постепенные, явные и неявные отказы.

Анализ статистических данных по внезапным и постепенным отказам показывает, что в среднем для приборов 1-го и 2-го поколений соотношение между указанными типами отказов равно 0,5. Увеличение доли постепенных отказов указывает на возможную некачественную отработку электронных схем, а увеличение доли внезапных отказов — на имеющиеся недостатки в выборе и использовании элементной базы. В большинстве случаев следует ориентировать конструктора на то, чтобы число неявных (скрытых) отказов было сведено к минимуму. Например, если для электронных осциллографов доля неявных отказов превышает 0,3—0,4, то это свидетельствует о неиспользованных возможностях системы индикации либо о влиянии большой доли постепенных отказов на указанное соотношение.

При анализе надежности отдельных узлов прибора необходимо выяснить, какой из узлов является наименее надежным. Это легко определяется с помощью статистических данных, при этом, если для какого-либо узла обеспечивается соотношение

$$n_{\text{оу}} \geqslant (0,2—0,3) n_{\text{оп}}, \quad (3.1)$$

где  $n_{\text{оу}}$  — число отказов узла;  $n_{\text{оп}}$  — число отказов прибора, то следует обратить внимание на данный узел, как на наименее надежный участок схемы прибора.

При отсутствии достаточных данных основное внимание следует обращать на оригинальные узлы, т. е. узлы, которые были впервые разработаны для данного прибора. Необходимо также проанализировать данные по радиоэлементам и уяснить, какие элементы отказывают наиболее часто в условиях, в которых они используются в приборе. При наличии достаточного статистического материала можно определить, какой из параметров прибора является наиболее критичным.

Данные по периодическим поверкам, обобщаемые по форме, приведенной в табл. 2.1, позволяют экспериментально определить значение коэффициента, который можно использовать в качестве критерия для определения правильности выбора межповерочного интервала:

$$K_{\text{пр}} = N_3 / N_{\text{пр}}, \quad (3.2)$$

где  $N_3$  — число приборов, забракованных при поверке;  $N_{\text{пр}}$  — общее число приборов, прошедших поверку.

Для анализа конструкции рассматриваемого прибора можно использовать любые методы статистического анализа.

Укажем основные часто встречающиеся причины отказов, вызванные недоработками конструкторских и технологических служб.

К причинам, обусловленным ошибками конструкторской службы, следует отнести:

- некачественный расчет системы охлаждения и вентиляции прибора;
- неудачная компоновка прибора;
- неудачный выбор материалов;
- неудачный выбор допусков;
- некачественный выбор покрытий;
- неудачная конструкция кинематических узлов;
- недостаточная жесткость конструкции;
- нерациональная установка размеров;
- нарушения требований стандартов и неучет требований технологий.

К ошибкам технологической службы следует отнести:

- невозможность контроля исполнителем при изготовлении узла, детали, прибора;
- неправильный выбор вида пайки, сварки;
- неправильный выбор чистоты обработки и группы отделки;
- нетехнологичность отдельных узлов, плат;

— нетехнологичность конструктивной формы детали;

— неправильный выбор методов контроля.

Анализ надежности элементной базы, выбор которой в основном осуществляется на этапе эскизного проектирования, проводится по имеющимся в справочных данных λ-характеристикам. Имеется достаточное количество справочных данных о влиянии окружающей среды на надежность элементов, что позволяет выбрать и необходимый режим использования элементов.

Укажем лишь некоторые общие особенности выбора элементов, оказывающие влияние на надежность прибора. За рубежом принято все элементы независимо от наименований и типа разделять по уровням надежности на классы [22—24] (см. табл. 3.1). Указанные в таблице классы характерны для радиоэлектронной аппаратуры 1-го поколения. Для большей наглядности в табл. 3.2 показаны расчетные величины  $T_{ср}$  для условного прибора с числом элементов  $N_e=1000$ . Из таблицы видно, что выбор элементов является важнейшим средством повышения надежности, так как переход от одного уровня надежности к другому увеличивает  $T_{ср}$  на порядок.

Представляет интерес зависимость  $T_{ср}$  от сложности прибора. Как видно из многочисленных источников [21, 29],  $T_{ср}$  и  $N_{эл}$  связаны зависимостью

$$T_{ср} = A / N_{эл}. \quad (3.3)$$

Указанная зависимость — равнобочная гипербола, где  $A$  — параметр гиперболы, который целесообразно использовать в качестве показателя уровня, т. е. показателя, по которому можно сравнивать надежность приборов различной сложности. Так, например, в соответствии с [29] показатель уровня для приборов 1-го поколения равен  $(2—5) \cdot 10^5$ . Некоторые литературные источники [30] отмечают, что показатель уровня для приборов, в которых примерно выше 80% схемных решений выполнено на базе интегральных микросхем при соответствующей технологии изготовления приближает значение  $T_{ср}$  к величине технического ресурса.

При анализе статистических данных по отказам элементов в приборах специалист по надежности должен в соответствии с заданной величиной надежности опреде-

Таблица 3.1

Класс	Условное обозначение класса	$\lambda, \text{ч}^{-1}$	Примечание
Начальный	$O$	$2 \cdot 10^{-4}$	Элементы данного класса применяют для изделий общего пользования, не требующих количественной оценки надежности
Низкий	$R$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	Элементы данного класса применяют для изделий неответственного назначения, которые должны иметь количественную оценку надежности
Стандартный Разгруженный стандартный	$S$ $T$	$5 \cdot 10^{-6}$ $1,5 \cdot 10^{-6}$	К этому классу относятся элементы уровня $S$ , при этом надежность повышается в результате их использования в облегченных режимах работы
Разгруженный верхний	$DT$	$1 \cdot 10^{-7}$	Надежность элементов класса $T$ повышается в результате их использования в более облегченных режимах работы
Высший	$U$	$5 \cdot 10^{-8}$	

Таблица 3.2

Класс	$O$	$R$	$S$	$T$	$U$
$T_{\text{ср}}, \text{ч}$	5	66	200	2000	20 000

Таблица 3.3

Этап	Влияние фактора			
	отказ элементов	схемно-конструктивные недоработки	производственно-технологические отказы	ошибки в эксплуатации
Опытный образец	среднее	значительное	значительное	среднее
Опытная партия	значительное	среднее		незначительное
Серийное производство	то же		среднее	

лить, какой уровень надежности элементов необходим для обеспечения поставленной задачи. Из прочих факторов, снижающих значение надежности, следует отметить производственные и эксплуатационные.

Влияние различных факторов, снижающих надежность на различных стадиях создания прибора, видно из табл. 3.3. Удельный вес фактора, обусловленного отказами элементов при переходе от опытного образца к серийному повышается. С другой стороны, удельный вес схемно-конструктивных недоработок уменьшается. Это обусловлено наличием при создании опытных образцов и партий приборов недоработок (неудачные схемные решения, неоптимальная конструкция, технология и т. д.), которые по мере дальнейшего внедрения прибора в серийное производство устраняют. Примерно то же характерно и для факторов, обусловленных производственными причинами.

Такова примерная схема анализа статистических данных прибора-прототипа для получения ответа на вопрос, как должна быть решена задача по оценке надежности создаваемого прибора. При анализе статистических данных могут быть выявлены и другие причины отказов, свойственные данному конкретному типу приборов, его схемным особенностям, конструкции и т. д.

Когда в процессе эскизного проектирования становится известной схема прибора, специалист по надежности осуществляет ее ориентировочный расчет.

Расчет носит ориентировочный характер потому, что в нем не учитываются режимы использования элементов. Он основан на следующих допущениях:

- поток отказов является простейшим, т. е. стационарным, ординарным и без последствия;
- отказ любого элемента приводит к полной потере работоспособности;
- все элементы работают одинаково;
- все элементы работают в среднем эксплуатационном режиме;
- все элементы данного типа равнонадежны, т. е. величины средних значений интенсивности отказов одинаковы.

Расчет проводится по формуле

$$P = e^{-t/T_{cp}}. \quad (3.4)$$

В свою очередь,  $T_{\text{ср}}$  определяется из соотношения

$$T_{\text{ср}} = 1/\Lambda_{\text{общ}}, \quad (3.5)$$

где

$$\begin{aligned} \Lambda_{\text{общ}} = & \left[ (1 - 0,2K) \sum_{i=1}^{N_{\text{эл}}} n_i \lambda_{ci} + 0,8 \sum_{i=1}^{N'_{\text{эл}}} n'_i \lambda_{ci} \right] + \\ & + \sum_{i=1}^{N_m} m_i \lambda_{ui}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

$K$  — коэффициент, учитывающий, какую часть потока отказов составляют постепенные отказы, которые могут быть устранены при калибровке;  $n_i$  — число однотипных радиоэлементов, неконтролируемых рабочими индикаторами прибора;  $n'_i$  — число однотипных радиоэлементов, контролируемых рабочими индикаторами прибора;  $N_{\text{эл}}$  — число типов неконтролируемых радиоэлементов;  $N'_{\text{эл}}$  — число типов контролируемых радиоэлементов;  $N_m$  — число типов СВЧ и механических узлов;  $m_i$  — число однотипных СВЧ и механических узлов;  $\lambda_{ci}$  — средняя эксплуатационная интенсивность отказов  $i$ -го радиоэлемента;  $\lambda_{ui}$  — средняя интенсивность отказов  $i$ -го СВЧ или механического узла.

Если возникает необходимость в ориентировочном определении величины  $K_n$  — коэффициента неявных отказов, то на данной стадии указанный коэффициент можно определить следующим образом:  $K_n$  учитывает главным образом те отказы, которые обнаруживаются встроенными индикаторами прибора, т. е. чем больше система индикации развита, тем меньше должно быть в приборе неявных отказов. Ориентировочное определение корреляционной связи между коэффициентом, характеризующим систему индикации, назовем его коэффициентом индикации  $K_{\text{ин}}$ , и величиной  $K_n$  и дает возможность решить поставленную задачу.

Выражение для коэффициента индикации

$$K_{\text{ин}} = N_{\text{ин}} / N_0, \quad (3.7)$$

где  $N_{\text{ин}}$  — число основных параметров прибора, контролируемых встроенными индикаторами;  $N_0$  — общее число основных параметров прибора;

Найдем величину  $K_{\text{ин}}$  для двух хорошо известных приборов С1-5 и В3-13. Составим табл. 3.4. Как видно из таблицы, значения коэффициентов индикации  $K_{\text{ин}}$  для

приборов С1-5 и В3-13 равны соответственно 0,54 и 0,25.

Аналогичным образом определяют величины  $K_{ин}$  для интересующих нас приборов, наиболее близких к разрабатываемому. Величина  $K_{и}$  для данных приборов определяется по имеющимся статистическим данным. Далее строят корреляционное поле и выбирают сглаженную кривую, по которой определяют величину  $K_{и}$  по известному  $K_{ин}$ .

Таблица 3.4

Параметр прибора	Возможность обнаружения отказа с помощью встроенных индикаторов
<b>Осциллограф С1-5</b>	
Неравномерность частотной характеристики вертикального усилителя?	—
Чувствительность усилителя вертикального отклонения?	+
Импульсные характеристики (завал плоской вершины и величины выбросов)	+
Сопротивление входа	—
Чувствительность усилителя горизонтального отклонения (УГО)	—
Неравномерность частотной характеристики УГО	—
Сопротивление входа УГО	—
Параметры ждущей развертки (диапазон, напряжение запуска)	+
Параметры непрерывной развертки (диапазон, напряжение запуска)	+
Параметры калибратора длительности	+
Параметры калибратора амплитуды	++
<b>Ламповый вольтметр В3-13</b>	
Погрешность прибора	—
Входной импеданс	—
Коэффициент нелинейных искажений	—
Чувствительность	+

На точность данного метода влияют следующие факторы:

1. Тракты прибора, соответствующие определенным выходным параметрам, неравнонадежны. Это означает, что величина  $\lambda$ , например, по чувствительности прибора может быть больше, чем по полосе пропускания, следо-

вательно, различные узлы прибора могут иметь разную надежность.

2. Малые изменения параметров не всегда могут быть обнаружены рабочими индикаторами, и поэтому связанные с этими изменениями отказы не всегда могут быть отнесены к разряду явных. Рассмотренный метод не может быть использован для определения конкретных численных значений  $K_{\text{п}}$ . Он применим главным образом для грубых сравнительных оценок величины  $K_{\text{п}}$ .

После того как рассчитана надежность в соответствии со схемой прибора, специалист по надежности составляет перечень вопросов, которые должны быть решены на следующей стадии — стадии технического проектирования.

### 3.2. Техническое проектирование

На данной стадии проводится всесторонняя теоретическая и экспериментальная проверка схемных, теоретических и конструктивных решений разрабатываемого прибора и разработка конструкторской документации для опытного образца. Специалист по надежности совместно с главным конструктором разработки на данной стадии имеет дело с конкретным макетом создаваемого прибора, что дает возможность провести более глубокий теоретический и экспериментальный анализ надежности.

В соответствии с разработанным перечнем вопросов, которые должны быть решены, и планом работ по обеспечению надежности проводится уточнение всех выводов и величин, полученных на предыдущей стадии.

Как известно, надежность любого прибора определяется надежностью его комплектующих радиоэлементов, которая, в свою очередь, определяется режимами их работы. Речь идет главным образом об электрических и температурных режимах работы указанных элементов. О влиянии электрических режимов работы радиоэлементов на надежность прибора имеется специальная литература [11, 13]. Укажем лишь, что в зависимости от электрических режимов радиоэлементов их надежность может изменяться в весьма широких пределах (от 5 до 20 раз).

В приборостроении установились определенные требования к величине коэффициента электрической на-

$$K_{\text{нр}} = w_p / w_d \quad (3.8)$$

где  $w_p$  — рабочее значение параметра элемента, определенное экспериментальным либо расчетным путем;  $w_d$  — допустимое значение параметра элемента, найденное из условий обеспечения требуемой надежности.

При определении величины коэффициента электрической нагрузки используют те параметры, которые оказывают наибольшее влияние на надежность элемента. Например, для резисторов таким параметром является мощность рассеивания, для конденсаторов — напряжение, для полупроводниковых диодов — средний ток в прямом направлении и максимальное приложенное к диоду обратное напряжение, для приемно-усилительных ламп — амплитуда обратного напряжения на аноде, мощность, рассеиваемая на аноде и т. д.

Существуют определенные методы расчетно-экспериментального определения величин коэффициентов электрических нагрузок. Для аппаратуры, построенной на ЭВП и дискретных элементах с применением печатного монтажа, процедура измерения значений величин, необходимых для определения коэффициента электрической нагрузки, не вызывала особых трудностей, так как доступ к любым элементам был обеспечен.

С применением печатного монтажа и особенно при переходе к приборам 3-го поколения возможности определения электрических режимов экспериментальным путем уменьшились, так как доступа к отдельным элементам практически нет. В связи с этим электрические режимы работы элементов микросхем при их разработке определяют, исследуя электрические схемы, выполненные на дискретных элементах, и анализируя электрические параметры микросхем.

В табл. 3.5 приведены в качестве примера рекомендуемые значения коэффициентов электрической нагрузки для элементов, используемых при конструировании приборов.

Результаты исследований электрических и температурных режимов оформляются в виде таблиц режимов, которые отражают специфику проектируемой аппаратуры и особенности применяемых элементов. На основании подробного анализа этих таблиц главный конструктор разработки вместе со специалистом по надежности делает выводы о соответствии фактических электри-

ческих и температурных режимов установленным нормам. При наличии перегруженных элементов и зон перегрева разрабатываются мероприятия по их разгрузке и улучшению системы вентиляции.

Таблица 3.5

Наименование	Контролируемый параметр	Рекомендуемое значение коэффициента электрической нагрузки при $T = 20^\circ\text{C}$
Резистор	Максимальная рабочая мощность, рассеиваемая на резисторе	0,95
Конденсатор	Максимальное рабочее напряжение, приложенное к конденсатору	0,95
Полупроводниковый диод	Ток в прямом направлении	0,9
	Максимальное значение напряжения, приложенное к диоду в обратном направлении	0,85
Транзистор	Максимальное напряжение на коллекторе относительно эмиттера	0,8
	Максимальное напряжение на коллекторе относительно базы	0,85
	Максимальное напряжение на эмиттере относительно базы	0,85
	Средний ток коллектора	0,9
	Максимальная мощность, рассеиваемая на коллекторе	0,9

Как правило, эти мероприятия влияют на увеличение массы и габаритов прибора, поэтому окончательное решение является результатом компромисса между указанными параметрами и надежностью,

Если же выбранное решение не обеспечивает требуемой надежности, то необходимо включить в состав ЭИП элемент, который использован в приборе в форсированном режиме.

На стадии технического проекта специалист по надежности тщательно изучает данные об интенсивности отказов различных радиоэлементов, а также о характере имеющихся в них дефектов и их распределении с тем, чтобы разработать конкретные мероприятия по организации входного контроля указанных радиоэлементов. Например, если из статистических данных известно, что по какому-либо параметру элемента отмечается значительный процент выхода его из строя в процессе

эксплуатации, то при входном контроле указанный параметр элемента подвергается тщательной проверке. В мероприятиях должны быть представлены конкретная методика осуществления входного контроля и необходимая аппаратура, применяемая для указанных целей.

Когда вопрос выбора элементов решен и определены режимы их использования, можно переходить к уточнению величины надежности для создаваемого прибора. Надежность определяется расчетным путем, как и на предыдущей стадии. Метод расчета, проводимый на данной стадии, носит название уточненного расчета, который отличается от ориентировочного тем, что учитывает электрические и температурные режимы элементов. Расчет производят по формуле, аналогичной формуле (3.6), с той лишь разницей, что в ее состав вводят коэффициенты, учитывающие режимы радиоэлементов. Подобные расчеты подробно описаны в отечественной и зарубежной литературе [17].

Следующим важным шагом в оценке надежности прибора является оценка надежности узлов, входящих в данный прибор. Узлы прибора подразделяются на электрические и механо-кинематические. Методы оценки их надежности существенно различны. Надежность механо-кинематических узлов можно определить только экспериментальным путем, так как приемлемых для практики инженерных методов расчета их надежности не существует.

Если есть необходимость в расчете надежности прибора с учетом механо-кинематических узлов то, как мы видели ранее, при наличии данных об интенсивности отказов СВЧ и механических узлов такой расчет можно произвести, хотя получение этих данных является делом весьма сложным и дорогостоящим.

В этом случае для определения величины  $\lambda_{\text{ц}i}$  используется формула

$$\lambda_{\text{ц}i} = k_{\text{ц}i} / 4,5 k_{\text{ц}i}, \quad (3.9)$$

где  $k_{\text{ц}i}$  — число циклов срабатываний в час  $i$ -го узла в приборе, определяемое разработчиком экспериментально;  $k_{\text{ц}i}$  — гарантированное число циклов срабатывания  $i$ -го узла.

Испытания механо-кинематических узлов (в подавляющем большинстве это переключатели, элементы настройки, элементы сопряжения) проводят специалисты по надежности с участием заместителя главного

конструктора по конструкторской части на специальных стендах по определенной программе, предусматривающей полную проверку его износовых характеристик с определением наименее надежных элементов. Как правило, испытания проводят до полного износа узлов либо, когда отсутствует такая возможность, до 10000 циклов.

При отработке надежности узлов необходимо обратить внимание на следующее важное обстоятельство. Вероятность отказов, особенно постепенных, в значительной степени определяется условиямистыковки отдельных узлов. Это в свою очередь может потребовать установления определенных норм на их параметры. В приборостроении такая практика используется для унифицированных функциональных узлов массового применения (элементы источников питания, индикаторных устройств, пересчетные декады, детекторные головки и т. д.). Обычно синтез схем таких узлов производится уже при заданных нормах на их выходные параметры.

Для обеспечения заданных норм производят выбор и оптимизацию схем и устанавливают номиналы и допуски на параметры составляющих элементов. Здесь необходима проверка соответствия полученных реальных распределений параметров разрабатываемых узлов заданным нормам, которая осуществляется по методу Монте-Карло на ЭВМ [22]. При значительном несовпадении полученных распределений заданным нормам необходимо корректировать схему. При больших производственных запасах между реальными распределениями параметров и нормами необходимо ужесточить нормы (допуски) на указанный параметр и наоборот при отсутствии таких запасов — расширить. Подробное описание одного из методов установления норм на параметры узлов дано в [31].

Одним из самых распространенных методов оценки и обеспечения надежности электрических узлов является метод граничных испытаний, с помощью которого специалист по надежности определяет, в каких пределах могут изменяться параметры каждого элемента схемы, не вызывая отказа при заданных значениях параметров всех остальных элементов. При этом изменяют параметры отдельных элементов в сторону увеличения или уменьшения и фиксируют момент отказа всей системы. Указанный метод достаточно подробно разработан

в [32]. Границные испытания применяют в том случае, когда число исследуемых параметров равно двум.

Для определения области устойчивой работы при большем числе исследуемых параметров применяют метод матричных испытаний, при котором с помощью специального устройства осуществляют перебор всех возможных значений параметров при квантовании их с определенным шагом.

Имеются работы по автоматизации граничных испытаний, например [38]. Методы граничных и матричных испытаний с успехом нашли применение при исследовании схем приборов 1-го поколения, где для отработки одной схемы допускались значительные издержки времени и труда. С усложнением аппаратуры возникла необходимость в применении методов, сокращающих труд исследователя.

На стадии технического проектирования внимание специалиста по надежности должно быть сконцентрировано также на вопросах обеспечения ремонтопригодности приборов как изделий многоразового применения, которые должны подвергаться ремонту и профилактическому обслуживанию в процессе эксплуатации. Под ремонтопригодностью изделия согласно ГОСТ 13377-75 понимают свойство конструкции, заключающееся в ее приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания. Ремонтопригодность, как видно из определения, должна рассматриваться в широком плане, т. е. с учетом профилактических мероприятий.

Рассмотрим более подробно проблему обеспечения ремонтопригодности, учитывая, что данный вопрос применительно к ЭИА в литературе представлен недостаточно подробно. Необходимость учета показателей ремонтопригодности ЭИА вытекает из того, что для поддержания необходимого уровня безотказной работы при эксплуатации прибора его «врожденных» свойств, заложенных на этапах конструирования и изготовления, недостаточно.

Некоторые исследователи [29] показали, что объем и стоимость работ по поддержанию определенного уровня ремонтопригодности в значительной степени определяются особенностями конструкции самих приборов. Важным фактором в этом отношении является сложность приборов, так как при возрастании сложности его

конструкции возрастают объемы профилактирования, затрудняется контроль параметров из-за их многообразия, усложняется процесс поиска и локализации места неисправности.

Исследования указывают на наличие определенной связи между показателями безотказности и ремонтопригодности. Так, если прибор имеет недостаточную безотказность, требуется значительный объем ремонтных работ и, следовательно, высокий уровень ремонтопригодности. Но не только это обстоятельство определяет необходимость обеспечивать требуемый уровень ремонтопригодности. В настоящее время принято говорить о так называемой контролепригодности, т. е. приспособленности прибора к проведению работ, связанных с контролем его состояния.

Контроль состояния прибора необходим при проведении настроек и регулировочных работ, объем которых определяет эффективность конечных операций по производству и настройке прибора. Известны случаи, когда трудоемкость этих работ достигает 30—35% от всего процесса производства прибора. Правильно построенный процесс контроля состояния прибора, определяемый также особенностями его конструкции, дает возможность сократить объем указанных операций в два и более раз. Следовательно, контролепригодность как часть ремонтопригодности приборов связана в первую очередь с экономическими показателями.

Экономические показатели ремонтопригодности прибора проявляются и в его эксплуатации, так как ремонтопригодность прямо влияет на величину расходов по поддержанию приборов в исправном состоянии. На основании некоторых отечественных и зарубежных данных можно отметить случаи, когда годовые расходы по ремонту приборов превышают их первоначальную стоимость.

Кроме контролепригодности, составляющими ремонтопригодности являются доступность, легкосъемность, взаимозаменяемость.

Распределение времени по составляющим ремонта для приборов 1-го поколения следующее:

Время отыскания места отказа $t_1$	10%
Время диагностики отказа $t_2$	40%
Время замены отказавшего элемента $t_3$	48%
Время настройки, регулировки $t_4$	32%

Следовательно, более 80% времени расходуется на диагностику отказа, настройку и регулировку параметров.

Длительности этих трех составляющих ремонта определяются в основном контролепригодностью прибора. Иными словами, контролепригодность — основная составляющая ремонтопригодности электронного измерительного прибора. Для повышения высокой контролепригодности специалисты по надежности должны предусмотреть следующие мероприятия.

1. Необходимо иметь возможность количественного или качественного контроля каждого выходного параметра прибора, определяющего его функционирование, либо с помощью встроенных индикаторов, либо с помощью других приборов, для чего в приборе должны быть предусмотрены контрольные точки.

2. Каждая контрольная точка должна быть снабжена условным значком, поясняющим форму кривой получаемого напряжения.

3. Подключение приборов к рабочим точкам для измерений не должно изменять режимов работы исследуемого прибора.

4. В описании к прибору должна быть сформулирована определенная последовательность контроля выходных величин на рабочих точках (стратегия диагностики отказов).

5. Должен быть обеспечен легкий доступ к контрольным точкам для необходимых измерений.

6. В качестве контрольных точек можно использовать контактные соединения, например разъемы, оголенные места пайки электрического монтажа, выводы электродов активных элементов, выводы пассивных элементов и т. д.

7. Число контрольных точек должно быть минимальным, но достаточным для проверки режимов и определения места отказа.

Для определения числа контрольных точек необходим анализ возможных отказов, отнесенных, в первую очередь, к выходным параметрам, а также к узлам прибора, в которых они возникают. Если требуется более детальная локализация места неисправности, то кроме узлов принимают во внимание и элементы, отказы которых необходимо практически учитывать. В ряде случаев при сложных функциональных связях рекомендуется рассматривать функциональные схемы прибора. Выбор

необходимого числа рабочих точек и их локализация осуществляются на каждом конкретном типе прибора методом логического анализа. Для решения задачи можно рекомендовать и метод «половинного разбиения», описанный в [33].

Для количественной оценки ремонтопригодности на практике широко используется коэффициент готовности [17, 21, 24]

$$K_r = T_{cp} / (T_{cp} + t_p), \quad (3.10)$$

либо коэффициент профилактики

$$K_n = t_{\text{проф}} / (t_{\Sigma} + t_p + t_{\text{проф}}), \quad (3.11)$$

где  $t_{\Sigma}$  — суммарное время работы за наблюдаемый период;  $t_{\text{проф}}$  — суммарное время профилактики.

Если есть необходимость в оценке контролепригодности, то ее можно оценить с помощью коэффициента

$$K_k = t_p / (t_p + t_{\text{обн}}), \quad (3.12)$$

где  $t_{\text{обн}}$  — время обнаружения отказа, или

$$K_k = 1 / (1 + \mu), \quad (3.13)$$

где  $\mu$  — отношение  $t_{\text{обн}} / t_p$ .

Величина  $\mu$  определяется из статистических данных. Ориентировочные значения  $\mu$  для приборов 1-го поколения:

Электронные вольтметры . . .	1,2
Электронно-лучевые осциллографы	0,8
Измерительные генераторы	1,7

На этапе технического проекта при отработке вопросов ремонтопригодности специалисты по надежности должны обратить внимание также на:

- простоту и удобство разборки и сборки;
- наличие маркировки элементов;
- удобство доступа к схеме для замены деталей и узлов, обладающих повышенной  $\lambda$  или малой долговечностью;
- степень применения унифицированных деталей и узлов.

При необходимости экспериментального определения показателей ремонтопригодности можно использовать специальную методику [34], суть которой состоит в искусственном введении отказов в аппаратуру с последую-

щим восстановлением ее работоспособности. Методика позволяет выявить конструктивные факторы, снижающие ремонтопригодность, оценить достаточность придаваемых измерительных приборов и систем индикации и контроля, отображающих неисправность аппаратуры, оценить качество эксплуатационной документации и т. д. Испытания проводит специальная бригада, из состава которой выделяется лицо, вводящее отказы, и лица, устраняющие отказы.

На этапе технического проекта уделяют большое внимание работе с макетами прибора, которые изготавливают для проверки выполнения ТЗ на конкретных конструктивных решениях. Специалист по надежности проверяет работу макета прибора при граничных воздействиях эксплуатационной среды, и в первую очередь тепла и холода.

Макеты приборов помещают в соответствующие термокамеры, где заданные параметры проверяют с помощью специальной контрольно-измерительной аппаратуры при крайних рабочих значениях температуры. При необходимости могут быть сняты температурные характеристики отдельных ответственных узлов прибора, например задающего генератора, калибратора, пересчетной декады и т. д.

Механические испытания для макетов на стадии технического проектирования, как правило, не проводят. Однако при необходимости такие испытания проводят для проверки жесткости или износостойкости отдельных элементов конструкции.

По окончании этапа специалист по надежности составляет заключение о надежности, которое рассматривают при приемке этапа. В заключении указывают особенности прибора, определяющие его надежность: тип конструкции (блочная, неблочная), метод соединения отдельных элементов прибора (последовательный, параллельный), число элементов, работающих одновременно, активные элементы, на которых выполнен прибор (ЭВП, ПП, микросхемы), наличие встроенного контроля, наличие многофункциональных схем и т. д. Далее приводят результаты граничных и других видов испытаний, проведенных на данном этапе, а также результаты расчета прибора с указанием наименее надежного его узла и необходимые меры, которые следует принять для повышения надежности прибора.

Анализируются используемые элементы и режимы их работы, указывается число элементов несерийного изготовления, число элементов, которые требуют специального отбора, и число элементов, требующих входного контроля. Указывают элементы, работающие при значительных температурных и электрических перегрузках. Приводят результаты измерения температурных режимов. В заключении дают подробный анализ ремонтопригодности прибора, включающий вопросы подхода к замене элементов и регулировкам, наличие достаточного числа индикаторов и контрольных точек, необходимые меры по повышению ремонтопригодности конструкции.

По рассмотренным материалам формулируются выводы о достигнутой надежности в соответствии с требованиями, включенными в ТЗ, отмечают положительные стороны и недостатки, на которые необходимо обратить внимание на последующей стадии.

### **3.3. Этап опытных образцов**

На этапе опытных образцов главный конструктор разработки имеет дело уже не с макетом прибора, а с образцом, собранным в соответствии с разработанной конструкторской документацией. Специалист по надежности должен в первую очередь обратить внимание на то, реализованы ли в изготовленном образце все рекомендации, разработанные на предыдущих этапах.

К таким рекомендациям относятся:

- составление таблиц электрических и температурных режимов;
- проведение испытаний на износостойчивость разработанных кинематических узлов прибора;
- определение критичности регулировки и настройки отдельных блоков и узлов прибора с помощью регулировочных органов.

Методика работы по исследованию указанных факторов остается такой же, как и на предыдущей стадии. Новыми вопросами для стадии изготовления опытных образцов являются:

- определение режимов и продолжительности технической приработки;
- проведение испытаний на надежность опытных образцов.

Рассмотрим более подробно указанные вопросы. Технологическая приработка является основным меро-

приятием по выявлению и устранению так называемых «ранних отказов» путем наработки в течение определенного времени при определенных внешних воздействиях. Технологическая приработка осуществляется в заводских условиях перед приемкой ОТК.

Ранние отказы, т. е. отказы, определяемые в начальный период эксплуатации (в течение первых ее 50—100 ч) носят в основном производственный характер и обусловлены не низкой надежностью аппаратуры, а недоработками, связанными с нарушениями технологии, с недоброкачественными комплектующими изделиями, не прошедшими входного контроля, и с некачественной настройкой прибора.

Применение правильно организованной технологической приработки дает значительный эффект в выявлении указанных отказов и неисправностей и тем самым ограждает потребителя от необходимости рекламировать приборы. Технологическая приработка сочетается с вибротряской приборов на определенной частоте и амплитуде при включенном питании сети. В ряде случаев для повышения эффективности технологической приработки можно применить ускоряющие факторы (повышенное напряжение сети, повышенную температуру).

В процессе приработки с помощью органов управления производят переключения с оговоренной частотой для изменения режимов работы прибора. Длительность технологической приработки для электронных измерительных приборов выбирается в соответствии с рекомендациями главного конструктора разработки в пределах 14—30 ч. Рекомендации по режимам приработки сведены в табл. 3.6.

Во время технологической приработки визуально контролируется работоспособность приборов (блоков, если приработка осуществляется поблочно) при различных ее режимах. В процессе приработки ведется тщательный учет возникающих отказов. На стадии опытных образцов специалист по надежности в соответствии с приведенными выше рекомендациями и особенностями прибора представляет свои предложения по наиболее целесообразному режиму технологической приработки.

Как показывает практика, для приборов, выполненных на ЭВП, эффективным методом выявления ранних отказов может служить воздействие фактора «включение—выключение», для приборов на ПП, предпочтительнее режим работы при повышенной температуре.

При хорошо отлаженном производстве тряска не дает значительного эффекта и, наоборот, там, где культура производства недостаточна, тряска способствует выявлению «ранних отказов».

Испытания на надежность электронных измерительных приборов проводят в три этапа:

1) первичные испытания — проводят на этапе изготовления опытных образцов на базе предприятия-разработчика для выявления наиболее характерных схемно-конструктивных недостатков прибора, ориентировочной оценки соответствия его надежности заданной, уточнения расчетной величины надежности для включения ее в ТУ;

Таблица 3.6

Режим приработки	Описание режима
Технологическая тряска	Тряска с частотой 20—50 Гц при ускорении в течение 10 мин
Наработка	Циклами по 7 ч с часовым перерывом в течение времени, выбранного разработчиком для данного прибора во включенном либо выключенном состоянии
Форсированный:	Повышенное на 5—10% напряжение сети; повышенная температура окружающей среды (+25 . . . +35°C); периодические включение — выключение приборов с интервалами времени включенного состояния 15 мин и выключеного 5 мин, если прибор прогревается за время не более 15 мин.

2) оценочные испытания — проводят на этапе изготовления опытной (установочной) серии на базе предприятия-изготовителя для определения соответствия надежности прибора требованиям ТУ и окончательного уточнения ее величины, а также для выявления причин отказов и разработки мероприятий по их устранению;

3) контрольные испытания — проводят периодически предприятие-изготовитель на приборах серийных партий для систематического контроля соответствия надежности действующим ТУ.

По вопросу испытаний на надежность имеется литература, например [39], в которой достаточно подробно разработаны и обоснованы многие аспекты данного вопроса.

Поэтому рассмотрим лишь методологическую часть вопроса с учетом сложившейся специфики проектирования и изготовления электронных измерительных приборов.

Первичные испытания — это, как видно из самого названия, первые испытания приборов, которые совмещают со стендовыми испытаниями, они продолжаются в течение времени

$$t_i = 2T_{\text{ср}} \quad (3.14)$$

В процессе испытаний для получения информации о стабильности основных выходных параметров прибора производятся их периодические измерения через 50—100 ч (конкретное время устанавливается специалистом по надежности). Число образцов, выделяемых на испытания, должно быть не менее трех.

Таблица 3.7

Номер прибора	Номер отказа	Наработка с начала испытаний, ч	Условия испытаний	Проявление отказа	Характер отказа	Причина отказа	Меры, принятые для устранения отказа	Время отыскания причины отказа	Время устранения в причин отказа	Примечание

Испытания на надежность проводит специально выделенная комиссия, возглавляемая специалистом по надежности, причем они должны быть спланированы так, чтобы заканчивались до начала работы государственной комиссии.

Комиссия составляет специальную программу испытаний, содержащую:

- число испытываемых приборов;
- время испытаний;
- перечень контролируемых параметров, периодичность и методику их измерений.

По окончании испытаний составляют отчет, содержащий:

- ведомость отказов по форме, указанной в табл. 3.7;
- протоколы измерения выходных параметров;
- выводы по оценке соответствия полученной надежности заданной;

— рекомендации по повышению надежности.

По результатам первичных испытаний комиссия проводит анализ наиболее характерных схемно-конструктивных недостатков. Ориентировочная оценка соответствия полученной надежности заданной производится с помощью известных в литературе методов (например [17]).

Продолжительность оценочных испытаний определяется из соотношения

$$t_{ii} = 20 T_{cp} / N_{ob}; \quad (3.15)$$

где  $N_{ob}$  — число образцов.

Рекомендации по числу испытываемых образцов приведены в табл. 3.8. Оценочные испытания проводят 3—5 циклами, продолжительность которых определяется программой испытаний. Обычно продолжительность цикла лежит в пределах (0,2—0,3)  $t_{ii}$ .

Таблица 3.8

Степень сложности ЭИА (число элементов, шт.)	Число образцов, шт.
Более 4000	2—4
1000—4000	3—6
Лю 1000	Не менее 6

Программа оценочных испытаний содержит подробное описание режимов испытаний, длительность которых выбирают из следующего соотношения:

- воздействие повышенной температуры 15% цикла;
- номинальное напряжение сети 35% цикла;
- пониженное напряжение сети 25% цикла;
- повышенное напряжение сети 25% цикла.

Испытания при повышенном и пониженном напряжениях сети проводят при нормальных климатических условиях при изменениях напряжения питания 220 В +  $\pm 10\%$  (повышенное напряжение) и 220 В —  $10\%$  (пониженное напряжение). Испытания при повышенной температуре осуществляют в специальной термокамере либо в помещении, в котором температуру можно изменять и поддерживать в требуемых пределах. Значение окружающей температуры в этих условиях равно  $+35^{\circ}\text{C}$ .

Перед началом испытаний и после каждого цикла проводится проверка параметров в соответствии с программой испытаний.

По окончании оценочных испытаний производится подробный анализ отказов, а также материалов испытаний и измерений и составляется акт, который содержит те же разделы, что и отчет по первичным испытаниям, но с более подробным анализом. В акте приводится программа испытаний и формулируются выводы по соответствуанию полученной надежности заданной. По выводам можно судить о возможности внедрения прибора в серийное производство.

При проведении контрольных испытаний время испытаний выбирается из соотношения

$$t_{ii} = 10 T_{\text{ср}} / N_{\text{об.}} \quad (3.16)$$

В остальном контрольные испытания не отличаются от оценочных. Формулы (3.14—3.16) для расчета времени испытаний приняты из практических соображений.

#### 4. ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ

Широкий и сложный комплекс вопросов, решаемых подразделением надежности в процессе проектирования любой радиоэлектронной аппаратуры вообще и электронной измерительной аппаратуры в частности, требует четкого определения его основных задач и положений, для чего необходимы ответы на следующие вопросы:

- место подразделения надежности на предприятии;
- характер ее взаимодействия с другими службами и подразделениями предприятия;
- требования, предъявляемые к специалистам подразделения надежности;
- характер финансирования работ, выполняемых подразделением надежности.

По указанным вопросам в настоящее время имеется литература, отражающая опыт подразделений надежности за последние полтора десятка лет, который связан с различными условиями работы, спецификой аппаратуры и сложившейся организационной структурой. При этом имеются противоречивые точки зрения. Принято считать и у нас, и за рубежом, что на подразделения надежности возлагается ответственность за правильную

формулировку требований к надежности при составлении договоров, за составление программы ее обеспечения на различных этапах проектирования и производства и проведение необходимого комплекса испытаний.

В соответствии с этим подразделение надежности можно отнести к основным научно-исследовательским подразделениям, его руководитель непосредственно подчинен техническому руководителю предприятия. Вопрос о положении подразделения надежности заслуживает отдельного разговора, так как теория и практика надежности охватывает настолько большое многообразие видов деятельности, что ее эффективность зависит от положения, занимаемого подразделением надежности на предприятии.

Когда подразделение надежности входит в состав другого подразделения, оно перестает быть независимым в своих критических суждениях. Отсюда вывод: группа надежности должна быть организационно независима от всех других отделов предприятия, но при этом руководство должно гарантировать тесное взаимодействие с каждым из них.

Подразделение надежности должно выполнять две функции: исследовательскую и контрольную. Персонал службы надежности по отношению к конструктору должен проводить объективную независимую политику, но при этом с конструктором не следует снимать ответственность за обеспечение надежности. На различных этапах разработки в зависимости от конкретной ситуации служба надежности проявляет себя либо как помощник разработчика (исследовательская функция), либо как инспекция (контрольная функция).

Исследовательская функция состоит в оказании помощи главному конструктору в проведении различных аналитических работ по оценке и обеспечению надежности разрабатываемых приборов. Контрольная функция подразделения надежности состоит в проверке изделий и техдокументации для определения причин возможных отказов.

Опыт обеспечения надежности ЭИА дает возможность сформулировать следующие принципы организации подразделения надежности.

Основные задачи службы надежности разрабатывающего предприятия—оценка достигнутой надежности, определение причин возможных отказов и разработка мер по их устранению — могут быть решены в том слу-

чае, если процесс оценки и повышения надежности будет охватывать единой системой деятельность всех без исключения подразделений предприятия.

Это возможно при наличии координирующего органа, организационно независимого и подчиненного администрации. При этом необходимая эффективность работ по надежности достигается тесным взаимодействием подразделения надежности с другими подразделениями предприятия при высокой квалификации исполнителей и искусстве руководства.

Вряд ли можно представить себе эффективное подразделение надежности, входящее, например, в состав отдела технического контроля, работа которого связана с контролем и поддержанием существующего технического уровня, в то время как задачей службы надежности является непрерывное повышение уровня надежности. В любом случае, если подразделение надежности является частью другого подразделения, результаты его работы будут неэффективными из-за неполного охвата всех работ предприятия в части оценки и повышения надежности.

Таким образом, только независимое, самостоятельное и авторитетное подразделение надежности, составленное из высококвалифицированных специалистов, в состоянии решить поставленные задачи. Однако необходимо указать на возможную крайность. В ряде организаций подразделение надежности наделено такими серьезными правами, как право остановки процесса приемки технической документации, сочетающееся с обязанностью проверки всей технической документации в полном ее объеме.

Проверка документации в полном объеме — это весьма сложное дело, причем она выполняется органами нормализации и стандартизации и, следовательно, подразделению надежности дублировать его работу нет смысла. Пользование правами остановки процесса приемки технической документации создает нездоровую атмосферу во взаимоотношениях между подразделениями, так как в данном случае подразделение надежности дублирует функции администрации, которой дается право принимать окончательное решение по любому вопросу деятельности предприятия.

Предоставление прав заместителя технического руководителя начальнику службы надежности в принципе возможно, хотя и не является обязательным, так как

практика показывает, что руководитель, поле деятельности которого расширяется за счет вопросов надежности, в дальнейшем от надежности отходит, занимаясь решением проблем общетехнического характера.

Отличие подразделения надежности от других подразделений предприятия состоит в том, что ему присвоено право оценивать работу главного конструктора разработки в конце каждого этапа, причем положительное решение подразделения надежности является основанием к закрытию этапа.

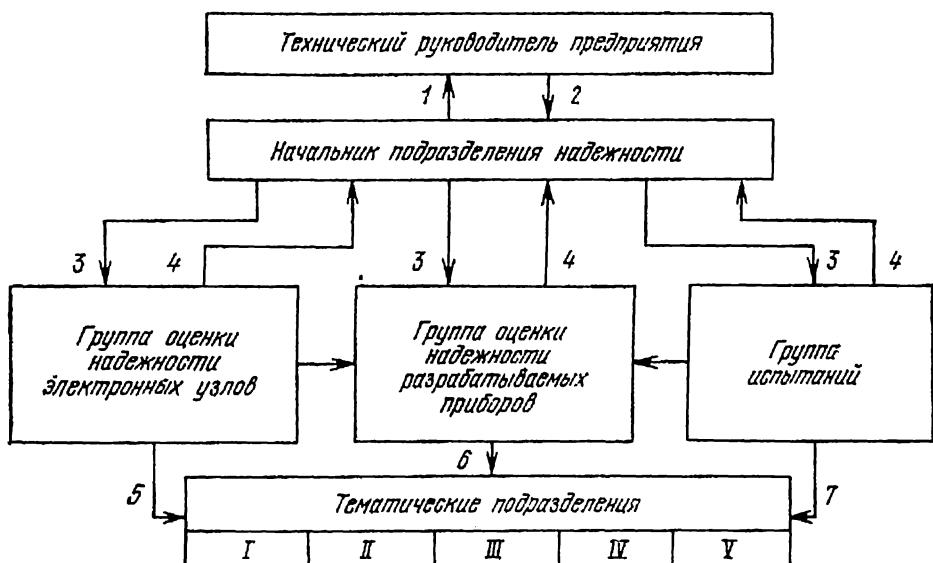


Рис. 4.1. Структура подразделения надежности разрабатывающего предприятия и схема взаимодействия.

Обозначения потоков информации: 1 — информация о достигнутой надежности; 2 — методические указания, распоряжения; 3 — управляющие воздействия; 4 — информация о результатах расчета и испытаний; 5 — граничные испытания, исследования режимов; 6 — расчеты на надежность, проведение анализа надежности, ремонтопригодности, взаимозаменяемости и т. д.; 7 — испытания узлов, приборов.

Для определения характера взаимодействия службы надежности с другими службами предприятия необходимо рассмотреть структуру самого подразделения надежности. Структура служб надежности обусловлена спецификой разрабатываемой продукции.

Сложившаяся структура разрабатывающего предприятия применительно к задачам обеспечения надежности в условиях отрасли приборостроения изображена на рис. 4.1. Из рисунка видно взаимодействие подразделения надежности с другими подразделениями разрабатывающего предприятия.

Основными задачами подразделения надежности (это может быть отдел, лаборатория, сектор) являются:

— методическое руководство и координация всех работ по вопросам надежности, проводимых на предприятии, охват единой системой организационно-технических мероприятий по повышению надежности всего цикла разработки, изготовления и испытания опытных образцов;

— эффективный контроль схемных и конструктивных решений прибора для обеспечения требуемой надежности, для оценки эффективности выполненных работ по обеспечению надежности,

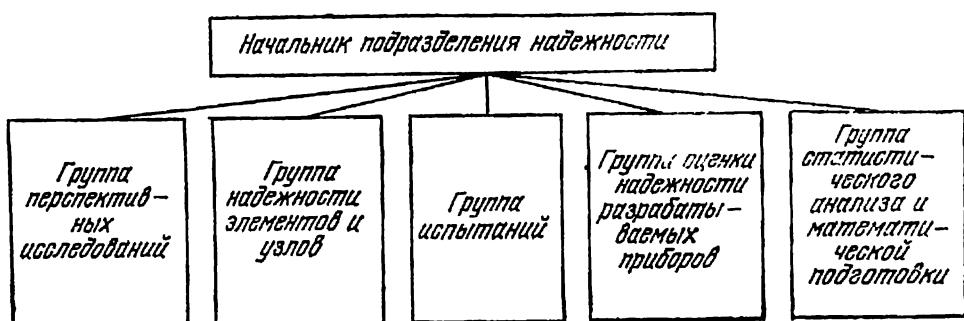


Рис. 4.2. Структура подразделения надежности головного разрабатывающего предприятия.

— изыскание новых путей оценки и обеспечение надежности в соответствии с задачами, вытекающими из требуемой надежности.

На рис. 4.2 изображен еще один вариант структуры подразделения надежности применительно к головному разрабатывающему предприятию.

Рассмотрим задачи групп подразделений надежности более конкретно.

**Группа перспективных исследований.** Основные задачи:

— проведение исследований в части изыскания новых путей оценки и обеспечения надежности по прогнозированию, расчету и испытаниям;

— разработка стандартов и методических указаний по различным вопросам, возникающим из практики работы подразделения.

Финансирование группы осуществляется либо за счет договоров, либо за счет централизованных отчислений.

Численность группы определяется сложностью и объемом выполняемых НИР. Как правило, численность не превышает 10% всего состава подразделения надежности.

**Группа надежности элементов и узлов.** Основные задачи:

- сбор информации по надежности отдельных элементов, применяемых при проектировании электронных измерительных приборов, а также отдельных унифицированных узлов;
- составление справочных пособий по надежности элементов для разработчиков;
- участие в разработке ограничительных перечней материалов и комплектующих изделий, разрешенных к применению на предприятии и в данной разработке;
- разработка рекомендаций и норм по облегчению режимов элементов, применяемых в приборе, разработка рекомендаций по правильному схемному применению комплектующих элементов;
- проверка рабочих режимов элементов и составление карт режимов. Разработка рекомендаций по улучшению режимов. Выработка предложений по замене элементов на более надежные;
- проведение граничных испытаний всех вновь разработанных узлов;
- исследование и анализ элементов, отказавших в процессе испытаний;
- разработка рекомендаций по осуществлению входного контроля элементов.

Финансирование работ осуществляется за счет средств, выделяемых главному конструктору разработки. Численность группы определяется объемом работы и не превышает 10—15% от общей численности подразделения надежности.

**Группа испытаний.** Основные задачи:

- проведение механических и климатических испытаний макетов, узлов и приборов в процессе стендовых и государственных испытаний;
- проведение износовых испытаний кинематических узлов;
- техническое обслуживание испытательного оборудования перед испытаниями и во время испытаний;
- организация и проведение испытаний на надежность опытных образцов;

— разработка и изготовление простейшего нестандартного оборудования и приспособлений для проведения испытаний;

Финансирование работ осуществляется за счет выделяемых предприятию средств на проведение ОКР. Численность группы составляет примерно 25—30% от общей численности подразделения надежности.

**Группа оценки надежности разрабатываемых приборов.** Основные задачи:

— разработка и участие в согласовании количественных требований по надежности и ремонтопригодности прибора;

— анализ статистических данных по приборам-прототипам с целью определения возможных наименее надежных узлов;

— рассмотрение различных вариантов построения приборов и его отдельных узлов с учетом требований к надежности;

— разработка ориентировочных количественных требований к надежности отдельных узлов, участие в составлении ЧТЗ на разработку указанных узлов;

— проведение ориентировочных расчетов на надежность прибора в целом;

— разработка общих требований и рекомендаций по обеспечению надежности, ремонтопригодности;

— проведение уточненных расчетов на надежность;

— анализ граничных и износовых испытаний отдельных электрических и кинематических узлов;

— анализ надежности применяемых элементов и разработка требований к режимам элементов;

— составление плана по обеспечению надежности на различных этапах разработки, контроль за выполнением плана;

— анализ ремонтопригодности конструкции и разработка рекомендаций по ее повышению;

— участие в испытаниях макетов и образцов приборов на надежность и определение влияния эксплуатационных факторов;

— определение ориентировочных сроков периодической поверки прибора;

— разработка рекомендаций по составу ЭИП;

— контроль удобства эксплуатации, эффективности встроенного контроля, качества эксплуатационной документации, разработка рекомендаций по их улучшению;

-- оценка надежности по результатам испытаний;

- определение режимов и продолжительности технологической приработки прибора;
- уточнение требований к входному контролю отдельных покупных узлов и элементов прибора, обоснование необходимости тренировки покупных изделий;
- оформление технической документации по надежности.

Группа оценки надежности разрабатываемых приборов является центральным звеном подразделения надежности, куда направляется информация со всех других групп. Финансирование группы осуществляется за счет средств, выделяемых главными конструкторами разработки. Численность группы определяется объемом проводимых ОКР и составляет примерно 35—40% от общей численности подразделения надежности.

**Группа статистического анализа и математической подготовки. Основные задачи:**

- изучение отечественных и зарубежных источников для накопления статистических данных по надежности элементов, узлов, приборов и систем;
- разработка форм учета наработки и отказов приборов и узлов в процессе изготовления и испытаний;
- обработка материалов стендовых и первичных испытаний для получения количественных показателей надежности;
- сбор и обработка материалов по анализу надежности и качества в процессе серийного изготовления и эксплуатации;
- систематическая корректировка действующих норм и исходных данных по надежности;
- подготовка и хранение программ для ввода в ЭВМ по различным аспектам оценки надежности (границные испытания, расчеты на надежность, моделирование испытаний).

Финансирование группы может осуществляться в зависимости от характера проводимой работы за счет централизованных отчислений, договоров либо за счет проводимых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Численность группы составляет примерно 10—15% от общей численности подразделения надежности.

Требования к специалистам по надежности вытекают из специфики работ. На первый взгляд требования к специалистам могут показаться противоречивыми: с одной стороны, специалист по надежности должен

Таблица 4.1

Специальность	Требования к квалификации		
	с образование	стаж работы в годах (не менее)	необходимые знания и опыт работы
Инженер по перспективным исследованиям в области надежности ЭИА	Техническое либо физико-математическое	2	Знание основ теории вероятности и математической статистики, а также основ теории измерений, теории надежности, опыт принятия технических решений в области надежности и измерительных задач, умение и способность проводить критический анализ результатов НИР
Инженер по анализу надежности элементов	Техническое	2	Знание основ математической статистики, технических и физических особенностей элементов и материалов, знание основных причин отказов элементов и умение их анализировать, знание основных принципов входного контроля, тренировки и ускоренных испытаний элементов
Инженер по анализу надежности узлов (блоков)	Техническое	3	Опыт принятия технических решений, знание методов расчета и анализа надежности устройств, опыт координации работ и совместной работы с разработчиками, знание принципов построения и технических особенностей электронных измерительных приборов, желательен опыт серийного производства
Инженер по испытаниям приборов и узлов	Техническое со специализацией в области испытательного оборудования	2	Опыт принятия технических решений по проведению испытаний приборов и узлов на соответствие требованиям действующих стандартов и технических условий, знание особенностей испытательного оборудования и техники измерений

*Продолжение табл. 4.1*

Специальность	Требования к квалификации		
	образование	стаж работы в годах (не менее)	необходимые знания и опыт работы
Инженер по оценке надежности разрабатываемых приборов	Техническое со специализацией по основам надежности и электронной измерительной техники	3	Опыт принятия технических решений, глубокие знания процесса разработки электронных измерительных приборов, опыт координации работы и совместной работы с разработчиками, знание принципов построения приборов и их технических особенностей, умение применять на практике разработанные методические рекомендации, стандарты и руководящие материалы, желательен опыт серийного производства
Инженер по статистическому анализу	Физико-техническое либо математическое	2	Знание методов математической статистики и обработка статистических данных, опыт проведения анализа и обобщения результатов обработки статистических данных
Инженер по программированию	Математическое со специализацией в области программирования	2	Знание методов машинной обработки данных. Опыт работы по программированию. Знание основ программирования и умение составить программу для ЭВМ типа Минск-32, М-222 и др.

быть специалистом самого широкого профиля, с другой стороны, он должен иметь узкую специализацию как специалист по методам оценки надежности, основанным на теории вероятности и математической статистики. Данное противоречие удается разрешить тем, что каждый способ оценки надежности, например расчетный метод, метод испытаний, метод статистической обработки информации по надежности и т. д., имеет ярко выраженную специфику.

Таким образом, в подразделение надежности должны входить специалисты различных инженерных направлений.

Приведем квалификационную таблицу специалистов по надежности, составленную с учетом специфики работ (табл.4.1).

Планирование работы по надежности строится на том принципе, что все работы проводятся либо под руководством специалистов по надежности в подразделении главного конструктора, либо силами подразделения надежности. Последний способ более предпочтителен, так как при этом получается значительный эффект от специализации и повторяемости отдельных операций (измерение режимов элементов, граничные испытания и т. д.), что существенно повышает качество выполняемых работ.

Таковы основные принципы в организации работ по оценке и обеспечению надежности ЭИА в процессе ее разработки.

## **Список литературы**

1. Консон А. С. Экономика приборостроения. М., «Высшая школа», 1970.
2. Надежность в технике. Термины и определения. ГОСТ 13377-75. М., 1975.
3. Мирский Г. Я. Радиоэлектронные измерения. М., «Энергия», 1975.
4. Швецкий Б. И. Электронные измерительные приборы с цифровым отсчетом. Киев, «Техника», 1970.
5. Валитов Р. А., Сретенский В. Н. Радиотехнические измерения. Методы и техника измерений в диапазоне от длинных до оптических волн. М., «Сов. радио», 1970.
6. Доброхотов Б. А. Измерения в электронике. Т. 1, 2. М., «Энергия», 1965.
7. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. Пер. с немец. Под ред. В. Н. Сретенского. М., Физматгиз, 1963.
8. Термен Ф., Петит Д. Ж. Измерительная техника в электронике. Пер. с англ. Под ред. В. Г. Фролкина. М., ИЛ, 1955.
9. Приборы электронные измерительные. Общие технические требования. ГОСТ 9763-67. М., 1967.
10. Новопашенный Г. И., Новицкий П. В. Электронные измерительные приборы. М., «Энергия», 1966.
11. Кузинец Л. М., Рыманов Е. А. Надежность телевизионных приемников. М., «Сов. радио», 1969.
12. Астафьев А. В. Окружающая среда и надежность радиоэлектронной аппаратуры. М., «Энергия», 1968.
13. Азгальдов Г. Г., Райхман Э. П. О квалиметрии. М., «Стандарты», 1973.
14. Зараковский Г. М. Психофизиологический анализ трудовой деятельности. М., «Наука», 1966.
15. Эргономика. [Сборник статей]. Пер. с польск. М., «Мир», 1971.
16. Фрумкин Г. Д. Расчет и конструирование радиоаппаратуры. М., «Высш. школа», 1968.
17. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М., «Сов. радио», 1975.
18. Михайлов А. В. Установление допусков на параметры радиоэлектронной аппаратуры для обеспечения надежности. М., «Сов. радио», 1968.
19. Бруевич Н. Г. Об основах теории ошибок механизмов. — «Вестник машиностроения», 1943, № 7, 8.
20. Микроэлектроника. [Сборник статей]. Под ред. Ф. В. Лукина. М., «Сов. радио», 1969.
21. Идыу К. А. Оптимизация устройств автоматики по критерию надежности. М., «Энергия», 1966.
22. Беккер П., Йенсен Ф. Проектирование надежных электронных схем. Пер. с англ. Под ред. И. А. Ушакова. М., «Сов. радио», 1977.
23. Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры. [Сборник статей]. Пер. с англ. Под ред. И. И. Морозова. М., «Сов. радио», 1959.

24. Месяцев П. П. Надежность производства электронных вычислительных машин. М., Машгиз, 1964.
25. Лукомский Я. И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. М., Госстатиздат, 1961.
26. Юл Д. Э., Кендел М. Д. Теория статистики. М., Госстатиздат, 1960.
27. Справочник по надежности. Т. III. Пер. с англ. Ф. С. Соловейчика. Под ред. Б. Е. Бердичевского. М., «Мир», 1970.
28. Бердичевский Б. Е. Вопросы обеспечения надежности РЭА при разработке. М., «Сов. радио», 1977.
29. Фокин Ю. Г. Надежность при эксплуатации технических средств. М., Воениздат, 1970.
30. Вартанян А. Г., Мартынов Г. К. Требования к надежности узлов. — «Стандарты и качество», 1972, № 11.
31. Старосельский М. В., Бальчюнас А. А., Зенкевичюте Я. В. Оценка надежности радионизмерительной аппаратуры по постепенным отказам. — «Измерительная техника», 1974, № 5.
32. Васильев Б. В., Козлов Б. А., Ткаченко Л. Г. Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств. М., «Сов. радио», 1964.
33. Автоматизация радиоизмерений. М., «Сов. радио», 1966. Авт.: Балашов В. П., Валитов Р. А. и др.
34. Гаваргин Л. А. Организация работ по надежности. Рига, «Латвии», 1965.
35. Бутлер Б. Е. Существующая практика обеспечения надежности. — «Зарубежная радиоэлектроника», 1972, № 2.
36. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры. Под ред. Б. Ф. Высоцкого. М., «Сов. радио», 1977.
37. Долгов В. А., Касаткин А. С., Сретенский В. Н. Радиоэлектронные автоматические системы контроля (системный анализ и методы реализации). Под ред. В. Н. Сретенского. М., «Сов. радио», 1978.
38. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. Под ред. Б. Х. Кривицкого, В. Н. Дулина. М., «Энергия», 1977.
39. Груничев А. С., Кузнецов В. А., Шипов Е. В. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на надежность. Под ред. В. А. Кузнецова. М., «Сов. радио», 1969.

## **Оглавление**

Предисловие редактора	3
Введение	4
1. Общая характеристика и этапы создания ЭИА	12
1.1. Применение и основные требования	12
1.2. Классификационные признаки	14
1.3. Периодические поверки	32
1.4. Особенности конструкции	35
1.5. Технологичность, стандартизация и особенности производства	39
1.6. Испытания	45
1.7. Тенденции конструирования	49
2. Нормирование и оценка надежности ЭИА на ранних стадиях проектирования	52
2.1. Виды отказов ЭИА	52
2.2. Показатели надежности	56
2.3. Источники информации о надежности ЭИА	58
2.4. Связь технических параметров с надежностью	65
3. Обеспечение надежности при проектировании	74
3.1. Эскизное проектирование	74
3.2. Техническое проектирование	83
3.3. Этап опытных образцов	93
4. Подразделения надежности и специализация в области надежности	98
Список литературы	109

**Кроп А. Д.**

- K83** Анализ надежности электронной измерительной аппаратуры при ее проектировании./ Под ред. В. Н. Сретенского. М., Сов. радио, 1978 — 112 с., ил.— (Б-ка инженера по надежности).

30 к.

Излагается опыт обеспечения надежности электронной измерительной аппаратуры на всех этапах ее проектирования. Приведены инженерные методы оценки надежности.

Книга представит интерес для инженерно-технических работников, связанных с вопросами надежности и проектирования электронных измерительных приборов.

К 30405-027  
К 046(01)-78 — 32-78

**ББК 30.14**  
**6Ф**

**ИБ № 335**

**КРОП Александр Давыдович**

**Анализ надежности электронной  
измерительной аппаратуры  
при ее проектировании**

Под редакцией *B. N. Сретенского*

Редактор Т. М. Бердичевская

Художественный редактор Н. С. Шеин

Обложка художника Л. С. Вендрова

Технический редактор И. В. Орлова

Корректор О. И. Галахова

Сдано в набор 12.11.77 Подписано в печать 20.01.78 Т-03522

Формат 84×108/32 Бумага машиномелованная Литературная гарн.

Высокая печать Объем 5,88 усл. печ. л. 6,10 уч.-изд. л.

Тираж 8200 экз. Зак. 380 Цена 30 коп.

Издательство «Советское радио», Москва, Главпочтамт, а/я 693

Московская типография № 10 «Союзполиграфпрома»  
при Государственном Комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.