

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический
университет»**

Л. Н. Никитин, А. А. Пирогов, И. С. Бобылкин

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ
И КОНТРОЛЯ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

Утверждено учебно-методическим советом
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2018

УДК 621.396.6(075)
ББК 30.607я7
Н624

Рецензенты:

*кафедра основ радиотехники и электроники Федеральное казённое образовательное учреждение высшего образования «Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний» (начальник кафедры канд. техн. наук, доцент Р. Н. Андреев);
канд. техн. наук, доцент С. М. Федоров*

Никитин, Л. Н.

Методы и средства испытаний и контроля приборов и систем [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (2,1 Мб) / Л. Н. Никитин, А. А. Пирогов, И. С. Бобылкин. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7731-0673-9

В учебном пособии изложены общие вопросы испытаний и контроля приборов и систем, представлена информация о классификации электронной аппаратуры.

Предназначено для бакалавров направлений 12.03.01 «Приборостроение» (профиль «Приборостроение») и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» (профиль «Проектирование и конструирование электронных средств») очной формы обучения.

Ил. 39. Табл. 20. Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.396.6(075)
ББК 30.607я7

ISBN 978-5-7731-0673-9

© Никитин Л. Н., Пирогов А. А.,
Бобылкин И. С., 2018
© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2018

ВВЕДЕНИЕ

Целью учебного пособия является обобщение и систематизация учебно-методического обеспечения для бакалавров и магистров университета. В учебном пособии отражена методика изучения курса, изложены теоретические основы, необходимые для его успешного освоения в комплексе с задачами, примерами, лабораторными работами.

Необходимость контроля и испытаний приборов и электронных средств (ЭС) определяется тем, что из-за исключительной сложности конструкции и большого числа, взаимосвязанных между собой параметров и характеристик приборов и ЭС нельзя при выборе проектных, технологических и эксплуатационных решений полагаться только на априорные представления и теоретические предположения об их изменениях в различных условиях эксплуатации. Для подтверждения правильности выбранных и принятых новых решений необходим эксперимент - испытание.

Испытания относятся к числу наиболее ответственных и трудоемких этапов проектирования, производства и эксплуатации ЭС. Они классифицируются по видам и назначению, объему и содержанию, месту проведения и регламентируются соответствующими ГОСТ и ОСТ.

Приборы и ЭС в процессе эксплуатации подвергается воздействию окружающей среды. Среди множества факторов влияющих на работоспособность электронной аппаратуры (ЭА) можно выделить три вида воздействия характерных для любого климатического пояса - это воздействие положительной и отрицательной температуры и повышенной влажности. Под влиянием отмеченных факторов в материалах и элементах ЭА протекают сложные физико-технические процессы, изменяющие их свойства и способствующие отказам.

В связи с этим явилось необходимым:

–изучить влияние положительной и отрицательной температуры и влажности на изменение параметров электрорадиоэлементов и радиоматериалов и работоспособность ЭА;

–ознакомиться с принципом работы и конструкциями камер предназначенных для испытания ЭА на воздействие положительных и отрицательных температур и влаги в автоматизированном режиме; провести испытание ЭА на воздействие повышенных и пониженных температур и влаги в автоматизированном режиме.

Анализ технологических процессов испытаний и практика их проведения позволяют выделить характерные для всех видов испытания этапы, а именно: подготовку объекта и оборудования к испытаниям и собственно испытания. К последним относится управление процессом испытаний; измерение физических параметров объекта испытаний и внешних воздействий; обработка результатов измерений; анализ состояния объекта испытаний; выработка рекомендаций по корректировке проектных решений; регулировка; диагностирование и поиск неисправностей объекта испытаний; регистрация результатов или документирование технологического процесса испытаний.

Все перечисленные этапы состоят из сложных и трудоемких информационно-измерительных и управляющих процессов. Успешная их реализация невозможна без знания и правильного использования испытательного оборудования.

Выполнение расчётных и лабораторных заданий предусматривает изучение студентами заданий, связанных с ознакомлением технических условий (ТУ), технического задания (ТЗ), изучение проведения приемно-сдаточных испытаний, типов испытаний, испытаний на надежность и т.д.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ ПРИБОРОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

1.1. Классификация приборов и систем

Современные приборы и системы широко применяются в жизни людей. В зависимости от их назначения различают измерительные, информационные, управляющие, регистрирующие, контрольные, испытательные, технические, наблюдательные и другие приборы и системы (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Назначение приборов и систем

№	Название	Назначение
1	Измерительные	Измерение физических величин, исследование объектов, распознавание образов, диагностика
2	Информационные	Обнаружение объектов, информирование, сигнализация, накопление, обработка информации
3	Контрольные	Установка принадлежности объекта контроля заданному классу объектов, учет
4	Управляющие	Управление объектами, регулирование процессов, навигация, координация действий
5	Регистрирующие	Регистрация (запись) процессов, передача данных
6	Испытательные	Проведение испытаний устройств, объектов, продукции
7	Наблюдательные	Наблюдение за объектами и процессами, охрана объектов
8	Технические	Повышение качества жизни (безопасности и пр.)

В зависимости от физического принципа действия различают электрические, механические, электромеханические, пневматические, оптические, электронные, оптико-электронные и другие приборы и системы, в зависимости от области их применения. Все приборы и системы содержат в своем составе устройства, с помощью которых одна физическая величина (принимаемая

за входной сигнал) преобразуется в другую физическую величину (выходной сигнал). Такие устройства обычно имеют нормированные характеристики, т.е. выполняют необходимое преобразование в рамках установленных норм. В измерительных приборах и системах они называются измерительными устройствами (ИУ).

Основной функцией ИУ является преобразование величины, подаваемой на его вход, в сигнал, несущий информацию о свойствах этой величины. Поэтому к ИУ относится широкий круг средств измерений, включая измерительные приборы (ИП) и измерительные преобразователи (ИПр). Частично в него входят измерительные системы (ИС) и измерительные установки (ИУс).

Измерительным прибором называется средство измерений, предназначенное для получения значения измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

Отличительным признаком измерительного прибора является то, что его показания должны быть доступны для непосредственного восприятия потребителем информации, т.е. он всегда должен иметь устройство индикации (стрелочное, цифровое или иное), с которого непосредственно снимается показание.

По способу преобразования измерительного сигнала различают ИП прямого действия (прямого преобразования) и ИП сравнения (уравновешивающего преобразования). В ИП прямого действия измеряемая величина испытывает ряд последовательных измерительных преобразований, в результате которых она «доводится» до показания ИП. Погрешность таких ИП равна сумме погрешностей всех их звеньев. Поэтому для достижения высокой точности измерений все звенья таких ИП должны обладать высокой точностью. В результате ИП прямого действия уступают приборам уравновешивающего преобразования по точности. Однако такие приборы обладают более простой конструкцией

и высоким быстродействием. Поэтому они часто встречаются на практике.

В ИП уравнивающего преобразования значение измеряемой величины определяют на основе ее сравнения с мерой, которая хранится в ИП или воспроизводится в нем с помощью отрицательной обратной связи. В таких ИП погрешности звеньев, охваченных обратной связью, оказывают меньшее влияние на общую погрешность измерений, чем в ИП прямого преобразования. Поэтому с помощью ИП уравнивающего преобразования можно осуществлять прецизионные измерения. Недостатком таких ИП является более сложная конструкция и возможность потери устойчивости.

В зависимости от топологии обратной связи различают компенсационные и следящие ИП. В первом случае обратная связь «заводится» в промежуточную точку (внутри) ИП, во втором – непосредственно на вход ИП. Благодаря этому следящие ИП отличаются более высокой точностью, однако, как правило, имеют более сложную конструкцию.

В зависимости от способа формирования сигнала обратной связи различают ИП с ручным, автоматическим и программным уравниванием. В ИП с ручным уравниванием сигнал обратной связи создается потребителем информации. В ИП с автоматическим уравниванием этот сигнал формируется автоматически. В ИП программного уравнивания он поступает от специального устройства, задающего программу уравнивания.

В зависимости от значения сигнала уравнивания в установившемся режиме измерений различают ИП астатического и статического уравнивания. В ИП астатического уравнивания этот сигнал равен нулю, в ИП статического уравнивания – отличен от нуля.

По характеру вычислений, необходимых для получения результата измерений различают суммирующие и интегрирующие приборы, а также приборы с вычислением

сложной функции. Суммирующими называют приборы, в которых результат измерений образуется в результате суммирования его отдельных составляющих (например, суммирующий расходомер). Принцип действия интегрирующих ИП основан на использовании операции интегрирования (например, интегрирующий гироскоп). В ИП с вычислением сложной функции для формирования результата измерений используются сложные вычисления. В настоящее время такие приборы оснащаются встроенными микропроцессорами и микроконтроллерами. Благодаря этому становятся возможными реализация сложных алгоритмов вычислений и выполнение других необходимых функций: управление процессом измерений, адаптация к условиям измерений и пр. Такие приборы называются интеллектуальными. По уровню сложности и принципам структурной организации они приближаются к ИС и ИУс.

По способу индикации значения измеряемой физической величины ИП делятся на показывающие и регистрирующие. В показывающих ИП допускается только считывание показаний, в регистрирующих – их запись на бумажную ленту, магнитный носитель и пр., т.е. документирование и хранение результатов измерений. По способу записи показаний различают самопишущие и печатающие приборы. Если устройство индикации расположено на значительном расстоянии (дистанции) от объекта измерений, то соответствующие приборы называются дистанционными.

В зависимости от особенностей эксплуатации различают настенные, настольные, напольные, лабораторные, полевые, бортовые и другие приборы.

По виду выходного сигнала ИП делятся на аналоговые, цифровые и аналого-цифровые. Показание аналоговых ИП является непрерывной функцией измеряемой величины, т.е. при бесконечно малом изменении этой величины изменяется столь же мало. Такие приборы обычно имеют стрелочное или самопишущее отсчетное устройство. Показания цифровых ИП

представляются в цифровом виде. В них автоматически осуществляются дискретизация, квантование и кодирование измерительного сигнала. Благодаря этому цифровые ИП имеют ряд преимуществ по сравнению с аналоговыми приборами. Основные из них следующие: процесс измерения в цифровых ИП автоматизирован, цифровая форма показаний исключает субъективные ошибки измерений, связанные с неточным отсчетом показаний, возможна автоматическая обработка промежуточных результатов с целью исключения погрешностей вплоть до указания погрешности при каждом измерении. Благодаря этому стрелочные ИП постепенно заменяются цифровыми приборами. Вместе с тем цифровая форма показаний не всегда удобна для потребителя информации. Например, при цифровом отсчете высоты полета сложно прогнозировать изменение этой высоты в процессе управления движением летательного аппарата. По этой же причине спидометры автомобилей обычно оснащают стрелочной шкалой. Поэтому, несмотря на возможность цифровой индикации, цифровые приборы часто снабжают стрелочным отсчетным устройством.

Нужно ясно понимать, что аналого-цифровое преобразование измерительного сигнала является источником дополнительной погрешности измерений. Поэтому высокая точность цифровых ИП обеспечивается не столько этим преобразованием, сколько теми дополнительными возможностями обработки измерительных сигналов, которые появляются благодаря цифровой форме их представления.

Измерительным преобразователем называется средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и/или хранения, но не доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительные преобразователи (ИПр) составляют техническую основу всех средств измерений. Подобно

атомам и молекулам, являющимся основой любого вещества, ИПр являются базовыми элементами всех приборов и систем.

По виду преобразуемых величин различают измерительные преобразователи электрических величин в электрические, электрических – в неэлектрические, неэлектрических – в электрические и неэлектрических в неэлектрические. Примерами первых могут служить делители напряжения и тока, измерительные трансформаторы, измерительные усилители, нормирующие преобразователи и пр.; примерами вторых – измерительные механизмы электроизмерительных приборов, электроприводы и пр.; примерами третьих – датчики неэлектрических величин и, наконец, примерами четвертых – упругие элементы приборов, передаточно-множительные механизмы и пр.

В зависимости от места в измерительном канале различают предварительный, первичный, промежуточные и выходной ИПр. Первичным называют ИПр, к которому с помощью предварительного ИПр «подводится» измеряемая физическая величина. Обычно этим ИПр является чувствительный элемент ИУ.

Совокупность ИПр, осуществляющих преобразование измеряемой величины в первичный электрический сигнал, называется датчиком первичной информации. Обычно датчик представляет собой отдельный конструктивный узел, который размещается на объекте измерений или вблизи него. Он правильно выполняет свою функцию («дает» измерительный сигнал), если для этого созданы все необходимые условия: подведено электрическое питание, выполнены требования по монтажу, обеспечена защита от нежелательных воздействий.

Датчик и предварительный преобразователь в наибольшей степени подвержены воздействию неблагоприятных факторов объекта измерений и окружающей среды. Поэтому погрешность измерительного прибора в основном зависит от наличия предварительного преобразователя и погрешностей датчика.

В свою очередь, погрешности датчика зависят от физического принципа действия и состава его элементов, а также от конструкции датчика. Поэтому выбор физического принципа действия, состава используемых ИПр и конструкции датчика – наиболее важные задачи проектирования прибора

1.2. Надежность приборов и систем

Основным требованием, предъявляемым к современной радиоэлектронной аппаратуре, является пригодность использования ее по назначению в заданных условиях. Совокупность свойств, определяющих степень пригодности, характеризуется качеством. Составной частью качества является надежность, в понятие которой включается некоторая часть свойств, определяющих качество. Под надежностью принято понимать совокупность свойств, обеспечивающих безотказность, ремонтпригодность и долговечность приборов и систем. Понятие безотказность предусматривает свойство системы сохранять работоспособность в течение заданного времени в определенных условиях эксплуатации. Данное понятие тесно связано с другим важнейшим понятием теории надежности - отказом, определяющим полную или частичную утрату работоспособности приборов и систем.

Более широким понятием, чем отказ, можно считать неисправность. Под неисправностью понимают такое состояние приборов и систем, при котором хотя бы один основной параметр не соответствует установленному эксплуатационному допуску (основная неисправность) или когда имеет место ухудшение или нарушение второстепенных параметров, таких как удобство эксплуатации, внешний вид и т. п. (второстепенная неисправность или дефект). Следует отметить, что отказ является следствием только основной неисправности.

Приспособленность системы к предупреждению,

обнаружению и устранению отказов характеризуется ремонтпригодностью. Количественно ремонтпригодность оценивается затратами времени и средств на диагностику отказов с учетом необходимой квалификации обслуживающего персонала.

Восстанавливаемые и невосстанавливаемые системы и элементы не могут эксплуатироваться бесконечно долго. С течением времени происходит износ и старение элементов и систем, приводящие к отказам.

Для восстанавливаемых элементов суммарную наработку от начала эксплуатации (испытаний) до момента возникновения отказа, обусловленного основной неисправностью, принято называть долговечностью. При рассмотрении восстанавливаемых систем (элементов) в понятие долговечность вкладывается несколько иной смысл.

Долговечность восстанавливаемых систем зависит от долговечности входящих в нее элементов, технологии изготовления и условий эксплуатации.

Очевидно, что долговечность восстанавливаемых систем тем выше, чем больше долговечность входящих в нее невосстанавливаемых элементов. Долговечность восстанавливаемых систем ограничивается соображениями технической и экономической целесообразности их дальнейшего использования. При этом восстанавливаемые системы могут иметь большое число отказов за время эксплуатации, для устранения которых осуществляют ремонт ЭА, сопровождаемый заменой отказавших элементов новыми.

Суммарная наработка восстанавливаемых систем (элементов) от начала эксплуатации до ее прекращения обусловленная изнашиванием и (или) старением, называется техническим ресурсом. Суммарная наработка, характеризующая технический ресурс, меньше суммарной наработки, характеризующей долговечность. Принято считать, что ремонт приборов и систем, израсходовавших свой технический ресурс, экономически нецелесообразен. Помимо понятий долговечность и технический ресурс,

характеризующих надежность приборов и систем, существует понятие гарантийный срок службы, устанавливающее взаимоотношения между заказчиком и поставщиком. Гарантийный срок службы всегда меньше долговечности и технического ресурса. Если в течение гарантийного срока службы происходит отказ, то юридическую ответственность за это несет поставщик, который должен выполнить ремонт отказавших приборов и систем или, в случае невозможности ремонта, заменить их исправными.

По истечении гарантийного срока службы предприятие-изготовитель не несет ответственности за отказы приборов и систем, но при этом не исключается, что приборы и система должна быть надежными и технически пригодными для дальнейшей эксплуатации. Для количественной оценки рассмотренных свойств надежности пользуются рядом параметров и вероятностными характеристиками, полученными на основании сбора статистических данных об отказах.

С целью правильного группирования статистических данных об отказах, однозначности их определения и удобства анализа необходимо классифицировать все виды отказов по ряду признаков. Наличие такой классификации способствует правильной организации и проведению испытаний приборов и систем. Все виды отказов в зависимости от характера изменения выходных параметров приборов и систем во времени до момента возникновения отказа можно подразделить на постепенные и внезапные.

Постепенные отказы возникают в результате постепенного, а внезапные - скачкообразного изменения одного или нескольких основных параметров приборов и системы. При постепенных отказах изменение параметров во время эксплуатации или хранения происходит относительно медленно, что позволяет прогнозировать отказы. При внезапных отказах изменения свойств приборов и систем происходят быстро, что исключает возможность их предварительного обнаружения. Причинами возникновения

отказов могут быть: ошибки конструктора и несовершенство методов конструирования (конструкционный отказ); нарушения установленного технологического процесса производства или его несовершенство (технологический отказ); внешние воздействия, превышающие установленную для данной аппаратуры норму, а также нарушение правил эксплуатации (эксплуатационный отказ). Отказы, возникающие по любой из указанных выше причин, можно считать независимыми, в отличие от зависимых, причиной которых являются ранее возникшие отказы.

Отказы могут возникать при контроле и испытаниях приборов и систем, в период приработки, во время нормальной эксплуатации и на последнем ее периоде.

По наличию внешних проявлений отказы могут быть явными и неявными. Первые обычно легко обнаруживаются при внешнем осмотре или при включении аппаратуры, в то время как для обнаружения вторых требуется затрачивать много времени и проводить специальные измерения. В зависимости от возможности последующего использования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) после возникновения отказов различают полные отказы, до устранения которых использование аппаратуры оказывается невозможным, и частичные, приводящие к частичному ухудшению работоспособности.

В отличие от устойчивых отказов, устраняемых в процессе ремонта, иногда возникают самоустраняющиеся отказы. Продолжительность действия таких отказов мала (единицы и доли секунды) по сравнению с длительностью работы до следующего отказа. Эти отказы называют сбоями. Причинами сбоев могут являться действие различных помех и внутренние шумы. Ряд сбоев, быстро следующих друг за другом, вызывают перемежающий отказ. Примерами таких отказов могут быть искрение и пробой, возникающие в высоковольтной аппаратуре под действием влаги или ионизирующих факторов.

Для обеспечения заданной надежности прибора и

системы подвергают контролю или испытаниям на этапах конструирования, производства и эксплуатации. В дальнейшем контролем будем называть процесс установления соответствия между состоянием объекта контроля и заданной нормой путем восприятия контролируемых параметров и выдачи суждения о результате.

Испытанием будем называть процесс определения параметров прибора и системы по установленной методике с целью оценки их соответствия требованиям технических условий (ТУ).

Контроль отличается от процесса испытания тем, что он может быть как специально предусмотрен, так и производиться в случае необходимости в период отработки схемы, в ходе технологического процесса производства и во время эксплуатации. При этом прибор и система находятся в не определенных условиях окружающей среды. Чаще всего они бывают близкими к нормальным условиям эксплуатации. Обычно в процессе контроля параметры окружающей среды не контролируются. Наиболее широко применяется контроль в процессе производства. Одной из задач осуществления контроля является необходимость выявления причин возникновения неисправностей.

Проведение испытаний строго регламентировано по периодичности, объему, условиям их осуществления и целому ряду других показателей. Различают испытания на функционирование, на воздействие окружающей среды и на надежность.

Важнейшим требованием к проведению любых из указанных испытаний является обеспечение строгого соответствия условий окружающей среды заданным.

Различие указанных видов испытаний состоит в том, что при испытаниях на функционирование определяют заданные параметры изделия при работе в течение короткого интервала времени в определенных условиях; при испытаниях на воздействие окружающей среды определяют параметры при экстремальных характеристиках климатических условий и

механических воздействий; при испытаниях на надежность определяют значения параметров надежности по установленной методике при работе изделия в заданном интервале времени, в определенных условиях, с целью оценки их соответствия требованиям ТУ.

1.3. Факторы, определяющие надежность приборов и систем

Обеспечение высокой надежности приборов и систем требует знания и анализа факторов, от которых она зависит. Задача заключается в том, что необходимо получать не только статистические данные об отказах, но и анализировать причины их возникновения, оценивать запасы прочности и устойчивости систем, их способность к нормальному функционированию при отдельных ошибках обслуживающего персонала, а также при различных внешних воздействиях. При этом следует исследовать физико-химические процессы, происходящие как в элементах, так и в системе в целом на всех стадиях производства и эксплуатации приборов и систем. Источниками необходимых сведений для оценки надежности является реальная эксплуатация и испытания приборов и систем.

Рассмотрение факторов, определяющих надежность приборов и систем, позволяет правильно организовать контроль и испытания на этапах конструирования, производства и эксплуатации.

На этапе конструирования приборов и систем работает коллектив, и ошибки одного исполнителя оказывают относительно слабое влияние на принятие окончательного решения, так как они могут быть устранены другими.

На этапе производства, осуществление контроля и испытания готовых приборов и систем позволяют повысить надежность. При этом повышению надежности способствует применение средств автоматизации, уменьшающих влияние человека, повышение квалификации рабочих и инженерно-

технического персонала, а также улучшение условий труда.

На этапе эксплуатации надежность приборов и систем зависит от субъективных и объективных факторов. К субъективным факторам относят работу обслуживающего персонала, по вине которого, как показывает статистика, происходит 20 - 30% отказов. К объективным относят факторы, которые можно подразделить на внешние, приводящие к отказам по причинам, не зависящим от самой аппаратуры, и внутренние, зависящие от особенностей работы аппаратуры и входящих в нее элементов.

К внешним факторам относят действие окружающей среды (климатические воздействия), особенности эксплуатации, связанные с местом установки приборов и систем (механические воздействия), а также режимы работы. В данном случае под режимом работы следует понимать частоту включений и переключений, при которых в аппаратуре могут возникать переходные процессы, перенапряжения, толчки тока и т. д.

Частые включения и выключения влияют на механический износ ряда элементов. В некоторых видах аппаратуры, предназначенных для циклической работы, существенное влияние на тепловой режим оказывает соотношение длительной работы и перерывов.

К внутренним факторам относятся процессы старения и износа. Процессы старения происходят непрерывно, причем они совершаются как во время работы, так и во время хранения приборов и систем. Износ в основном имеет место в процессе, эксплуатации и зависит от воздействия ряда внешних факторов и от режимов работы приборов и систем, причем вероятность влияния внешних факторов возрастает по мере увеличения длительности эксплуатации и при нарушении режимов работы. Многообразие воздействующих на приборы и системы факторов и их взаимосвязь не позволяют утверждать, что приводимая на рис. 1.1 классификация является достаточно полной.



Рис. 1.1. Классификация объективных эксплуатационных факторов, действующих на приборы и системы

1.4. Классификация методов испытаний приборов и систем

Зависимость качества работы приборов и систем от рассмотренных выше факторов приводит к необходимости иметь своевременную информацию о соответствии приборов и систем предъявляемым к ним требованиям. Получение такой информации по результатам эксплуатации оказывается затруднительным и в ряде случаев нецелесообразным.

Во-первых, эта информация часто приходит с большим опозданием и относится к морально устаревающим приборам и системам.

Во-вторых, не все интересующие нас параметры могут быть измерены в условиях реальной эксплуатации.

В-третьих, точность и полнота информации оказывается недостаточной из-за невозможности использования в эксплуатационных условиях лабораторных приборов и систем.

Указанные причины приводят к необходимости разработки методов испытаний приборов и систем. Осуществление испытаний в нормальных эксплуатационных условиях необходимо также для определения работоспособности и степени соответствия параметров ЭА техническим требованиям (ТТ) и техническим условиям (ТУ).

Полученные в процессе испытаний статистические данные об отказах приборов и систем позволяют произвести расчеты надежности и определить ее зависимость от времени и степени жесткости воздействующих факторов. Принято различать внешние воздействия на приборы и системы называть нагрузками. Величина и характер нагрузок зависят от соответствующих внешних воздействий. В реальных условиях эксплуатации приборы и системы испытывает комплекс внешних воздействий, определяющих полную нагрузку.

Применяемые в настоящее время методы испытаний можно разделить на две большие группы: физические испытания реальных приборов и систем, или их макетов, и испытания, осуществляемые моделированием (рис. 1.2)

Физические испытания могут осуществляться в эксплуатационных и лабораторных условиях. В зависимости от вида приборов и систем, и условий их эксплуатации осуществляют испытания, называемые подконтрольной (опытной) эксплуатацией, при которой все нагрузки оказываются случайными. При этом периодически измеряют заданные параметры и проверяют состояние приборов и систем.



Рис. 1.2. Классификация методов испытаний приборов и систем

Лабораторные испытания отличаются от условий реальной эксплуатации тем, что при их проведении пока еще не представляется возможным моделировать все внешние воздействия (полную нагрузку) одновременно в тех случайных соотношениях, в которых они имеют место при

реальной эксплуатации.

Обычно при лабораторных испытаниях приборы системы подвергаются воздействию одной или двух определенных нагрузок. Это приводит к результатам, несколько отличным от полученных при реальной эксплуатации.

Совершенствование испытательного оборудования, имитирующего случайные нагрузки, позволяет приблизить лабораторные испытания к реальным условиям эксплуатации, что дает основание называть подобные испытания лабораторными испытаниями при случайных нагрузках.

В зависимости от величины нагрузки, воздействующей на приборы и системы, различают три вида лабораторных испытаний: на срок службы, ускоренные и на повреждающую нагрузку.

Испытания на срок службы по длительности близки к эксплуатационным. Но, как указывалось, на аппаратуру при этом воздействует не случайная, а определенная нагрузка.

При ускоренных испытаниях действующая нагрузка значительно больше эксплуатационной, что приводит приборы и системы к быстрому выходу из строя.

Испытания на повреждающую нагрузку заключаются в том, что приборы и системы подвергаются воздействию одной или ряда увеличивающихся нагрузок, приводящих к появлению отказа. В отличие от испытаний на срок службы в данном случае время испытаний мало. Недостатками рассмотренных видов испытаний являются необходимость наличия образцов или макетов приборов и систем, большие затраты времени, а также необходимость использования специального дорогого испытательного оборудования.

Испытания моделированием могут осуществляться методом, физического и математического моделирования.

Физическое моделирование заключается в том, что первичный параметр испытываемого устройства (процесс в элементе схемы или какое-либо внешнее воздействие) заменяется простой физической моделью, способной

имитировать изменения данного параметра. Физическое моделирование может осуществляться статистическими методами испытаний, частным видом которых являются граничные испытания.

Под граничными понимают такие испытания, при которых в определенных условиях наблюдают изменение выходных параметров модели при частных значениях входных параметров; частные значения входных параметров могут задаваться переменным сопротивлением или определенным образом регулируемой ячейкой. Конкретные условия работы модели могут задаваться с помощью термокамер, вибростендов и т. д.

Развитием граничных испытаний являются матричные испытания, при которых определяется надежность устройства в зависимости от совместных изменений значений первичных параметров в пределах установленных допусков.

Математическое моделирование процесса эксплуатации на электронных математических машинах позволяет сократить время, испытаний и исключить необходимость многократного их повторения.

Для осуществления математического моделирования необходима входная информация, получаемая в процессе реальной эксплуатации, в результате испытаний, а также путем теоретических и аналитических исследований. Сложность построения математической модели и определения необходимой информации пока ограничивает широкое применение этого метода.

При выборе метода испытаний приборов и систем следует исходить из требуемой степени достоверности результатов, а также из экономических соображений.

1.5. Ускоренные испытания

Ускоренные лабораторные испытания имеют целью выявить изменения электрических, механических и других параметров приборов и систем при сокращении длительности

испытаний и одновременном ужесточении условий эксплуатации, а также при форсировании режимов работы указанных средств. Осуществление более жестких условий эксплуатации может достигаться путем увеличения температуры (t , °C), процента влажности ($г$, %), механических и других воздействий. Форсирование режимов работы приборов и систем достигается путем повышения питающих напряжений или увеличения электрической нагрузки. При испытаниях аппаратуры, работающей в циклическом режиме, для его форсирования уменьшают время пауз, увеличивают частоту и количество включений.

Воздействие перечисленных выше ускоряющих факторов приводит к увеличению интенсивности отказов. В результате ускоренных испытаний оказывается возможным получить функциональную зависимость интенсивности отказов (λ) от внешних воздействий (t° , $г\%$, p , мм. рт. ст. и т. д.). Основная трудность проведения ускоренных испытаний заключается в необходимости установления соответствия законов распределения отказов при ускоренных испытаниях с законами нормальной эксплуатации. При этом необходимо, чтобы интенсификация процессов старения и выработки ресурса не приводила к увеличению нагрузок сверх установленных допусков, при которых могут возникать отказы и поломки.

Выбор форсированных режимов ускоренных испытаний основывается на результатах теоретического и физико-химического анализа данных о работе приборов и систем. Сложность осуществления ускоренных испытаний заключается в том, что мы располагаем весьма малыми значениями физики отказов, имеющих место при различных условиях эксплуатации разнообразных приборов и систем. Одним из путей получения необходимых данных является сбор и анализ статистического материала, позволяющего установить законы распределения различного вида отказов, выявить причины их возникновения и установить подобие этих законов как для приборов и систем, так и для их

элементов.

Наличие указанной информации позволяет решить вопросы о возможности ускорения физико-химических процессов, происходящих в приборах и системах при проведении испытаний.

Известно, что одним из основных показателей надежности является случайная величина - среднее время безотказной работы T_{cp} . Для определенных приборов и систем эта величина имеет некоторое функциональное распределение с математическим ожиданием $M[T_{cp}]$ и дисперсией D .

Очевидно, что среднее время безотказной работы T_{cp} зависит от совокупности различных, воздействующих на приборы и системы случайных факторов X .

Нашей задачей является установление функциональной зависимости

$$M[T_{cp}] = M[\bar{X}], \quad (1.1)$$

$$D = D[\bar{X}]. \quad (1.2)$$

Однако решение данной задачи, даже при современном уровне развития науки, оказывается почти невыполнимым для приборов и систем в целом и трудно выполнимым для отдельных элементов. Решение несколько облегчается, если ограничиться рассмотрением воздействия отдельно действующего фактора при прочих неизменных. Но и в этом случае вывод зависимостей (1.1) и (1.2) для отдельных элементов требует ряда упрощений и допущений, в какой-то степени искажающих физику процессов. Источником информации, необходимой для проведения ускоренных испытаний, могут являться как данные эксперимента, так и литературные данные о частоте отказов различных элементов в зависимости от воздействия внешних или внутренних факторов.

Перед началом испытаний необходимо провести анализ

условий эксплуатации, хранения и транспортировки приборов и систем, установить, какие нагрузки может испытывать прибор и система (увеличение питающих напряжений, количество включений, длительность работы и т. д.), а также интенсивность воздействия отдельных факторов (температура, влажность, вибрация и т. д.).

На первом этапе испытаний экспериментально или теоретически, используя имеющиеся литературные данные, выбираются воздействующие факторы, наиболее ускоряющие износ изделия.

При выборе воздействующих факторов и пределов их изменения необходимо исходить из возможности максимального ускорения физико-химических процессов, происходящих в аппаратуре и элементах при эксплуатации, избегая появления побочных процессов, искажающих картину износа и старения. Рекомендуется выбирать один или два фактора, при действии которых осуществляют ускоренные испытания.

При необходимости проведения испытаний на воздействия ряда факторов, испытываемые изделия разбивают на несколько групп, каждая из которых испытывается на действие одного или двух факторов при неизменных остальных. Следует иметь в виду, что под действием какого-либо одного фактора в разнородных элементах приборов и систем могут возникать различные процессы, протекающие с различными скоростями. Поэтому необходимо учитывать, какие физико-химические протекают в элементах приборов и систем, и какой может быть зависимость интенсивности отказов от скорости этих процессов. Аналитическое рассмотрение данных зависимостей настолько трудно, что единственным путем решения поставленных задач является экспериментальное исследование, сочетающееся с теоретическим анализом.

На втором этапе испытаний приборов и систем подвергают воздействию выбранных факторов. По результатам испытаний определяют режим и объем

ускоренных испытаний, время наработки на отказ и другие параметры надежности.

На третьем этапе испытаний, пользуясь полученными данными, разрабатывают методику ускоренных испытаний, в соответствии с которой осуществляют испытания других экземпляров или партий аналогичных приборов и систем. По результатам испытаний для каждого воздействующего фактора находится распределение частоты отказов и параметры $M[T_{cp}]$ и $\sigma[\bar{X}]$ с указанием доверительного интервала при заданном уровне достоверности.

По полученным данным выводятся аналитические зависимости (1.1) и (1.2) и строится график функции параметра распределения от воздействующего фактора. Затем параметры ускоренных испытаний пересчитывают для условий нормальной эксплуатации. В ходе пересчета определяют коэффициенты, связывающие время обычных и ускоренных испытаний. Как показывает практика, при рационально разработанной методике ускоренных испытаний возможно сокращение времени испытаний в 2 - 4 раза.

Задавшись уровнем достоверности, относительной (абсолютной) погрешностью, предполагаемым сроком службы, режимом испытаний, а также пользуясь полученными графической и аналитической (эмпирической) зависимостями, определяют объем испытаний и степень ускорения. Объем испытания существенно зависит от предполагаемого срока службы приборов и систем.

Недостатком рассмотренной программы подготовки к проведению ускоренных испытаний является ее длительность.

Предложенная последовательность работ справедлива при проведении испытания любых элементов и аппаратов. Однако установление интересующих нас зависимостей для сложных приборов и систем или систем оказывается длительным и трудоемким процессом. Поэтому, если предположить, что надежность приборов и систем не зависит от их взаимодействия и законы распределения отказов у них

одинаковы и экспоненциально, то закон распределения отказов испытуемых средств будет также экспоненциальным при всех принятых допущениях.

Отсюда оказывается возможным во многих случаях на основании испытаний элементов сделать вывод о надежности приборов и систем в целом.

Рассмотрим ряд примеров, показывающих, как, пользуясь экспериментальными или аналитическими зависимостями, можно выбрать режим ускоренных испытаний различных электрорадиоэлементов.

Известно, что надежность электровакуумных приборов зависит от внешних условий эксплуатации и от электрических режимов аппарата. Основными параметрами, характеризующими электрические режимы, являются коэффициент электрической нагрузки, напряжение накала и напряжения на аноде и экранной сетке. Коэффициентом электрической нагрузки электронных ламп называют отношение суммарной мощности рассеивания на электродах к суммарной допустимой мощности рассеивания:

$$K_H = \frac{P_H + P_a + P_{\text{Э}}}{P_{H0} + P_{\text{макс.а}} + P_{\text{макс.Э}}}, \quad (1.3)$$

где P_H - реальная мощность накала;

$P_a, P_{\text{Э}}$ - реальные мощности рассеивания на аноде и экранной сетке;

$P_{\text{макс.а}}, P_{\text{макс.Э}}$ - максимальные мощности рассеивания на аноде и экранной сетке;

P_{H0} - номинальная мощность накала.

Очевидно, что в нормальном режиме при коэффициенте нагрузки $K_H=1$ средний срок службы лампы равен T_1 . Увеличение мощности, рассеиваемой на электродах лампы, т. е. работа при перегрузке, приводит к сокращению среднего срока службы лампы до T_2 и росту интенсивности отказов.

Наличие зависимости относительного изменения

среднего срока службы (T_2/T_1) лампы от коэффициента погрузки (K_H) позволяет установить степень надежности лампы (рис. 1.3).

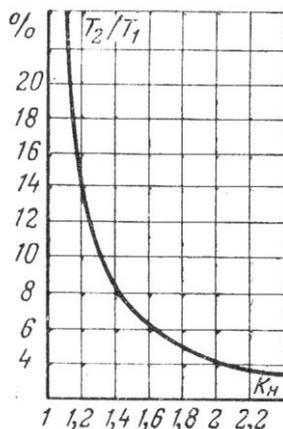


Рис. 1.3. Зависимость относительного изменения среднего срока службы сверхминиатюрных ламп от коэффициента нагрузки

Если относительное изменение среднего срока службы при увеличении K_H оказывается больше допустимого значения, то надежность лампы выше заданной. В противном случае лампа оказывается ненадежной. Так, например, из графика на рис. 1.3 следует, что при увеличении K_H на 20% ($K_H = 1,2$) $T_2/T_1 = 14\%$. Это означает, что средний срок службы сокращается в семь раз ($100/14 \approx 7$). Следовательно, если при $K_H = 1,2$ $T_2/T_1 > 14\%$, то лампа в нормальном режиме будет работать в течение времени T_1 . Если же в процессе ускоренных испытаний значение $T_2/T_1 < 14\%$ (при $K_H = 1,2$), то это свидетельствует о ненадежности лампы.

Знание электрической зависимости интенсивности отказов приемно-усилительных ламп от напряжения накала позволяет осуществить ускоренные испытания за счет увеличения напряжения накала. Интенсивность отказов при рабочем напряжении U_H определяется формулой:

$$\lambda_H = 0,4\lambda_{H0} + 0,6\lambda_{H0}\left(\frac{U_H}{U_{H0}}\right)^{12}, \quad (U_H > U_{H0}) \quad (1.4)$$

где λ_{H0} - интенсивность отказов при номинальном напряжении накала;

U_H - рабочее напряжение накала;

U_{H0} - номинальное напряжение накала.

Аналогично можно воспользоваться эмпирической формулой зависимости интенсивности отказов от анодно-экранного напряжения (U_a):

$$\lambda(U_a) = \lambda_0 \left(\frac{U_a}{U_{a0}}\right)^{1.75}, \quad (1.5)$$

где U_a - рабочее анодно-экранное напряжение;

U_{a0} - номинальное анодно-экранное напряжение.

Наличие экспериментально установленной связи среднего времени безотказной работы транзисторов (П13, П16) от мощности, рассеиваемой на коллекторном переходе и от температуры окружающей среды позволяет осуществить их ускоренные испытания:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_2 = T_1 e^{-0,24(P_2 - P_1)}; \\ T_2 = T_1 e^{-0,1045(t_2 - t_1)} \end{array} \right\}, \quad (1.6)$$

где T_1 - среднее время безотказной работы при нормальной мощности рассеивания (P_1) и нормальной температуре (t_1);

T_2 - среднее время безотказной работы при повышенной мощности рассеивания (P_2) и повышенной температуре (t_2).

Из формул следует, что увеличение мощности рассеивания или температуры окружающей среды приводит к уменьшению среднего времени безотказной работы T_2 .

Одним из наиболее широко применяемых в приборах

элементов являются резисторы (около 40% всех элементов). Интенсивность отказов резисторов в значительной степени зависит от температуры окружающей среды и рассеиваемой мощности. Аналитическая зависимость, связывающая относительную интенсивность отказов с температурой окружающей среды и рассеиваемой мощностью, имеет вид:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \exp \left\{ \frac{B \left[t_0 - t_H + R_t P_H \left(\frac{P_P}{P_H} - 1 \right) \right]}{(273 + t_0 + R_t P_P)(273 + t_H + R_t P_H)} \right\}, \quad (1.7)$$

где λ - интенсивность отказов в рабочем режиме при реально рассеиваемой мощности (P_P);

λ_0 - интенсивность отказов при допустимой (номинальной) рассеиваемой мощности (P_H) и предельно допустимой (номинальной) температуре окружающей среды (t_H);

t_P - реальная температура окружающей среды;

R_t - тепловое сопротивление теплоотдачи с поверхности в окружающую среду;

B - постоянная, определяемая из опыта.

В соответствии с приведенной формулой для конкретного типа резистора строят зависимости $\lambda/\lambda_0 = f(t_0, P_P/P_H)$ при определенных путем обработки статистических данных постоянных B , R_t и λ_0 . Пользуясь графиком (рис. 1.4), можно найти величину в зависимости от P_P и t_0 .

Столь же широкое применение в приборах имеют конденсаторы, интенсивность отказов которых того же порядка, что и резисторов. Интенсивность отказов конденсаторов существенно зависит от электрических режимов, температуры и влажности окружающей среды на средний срок службы конденсаторов выражается следующей эмпирической, зависимостью:

$$T_{CP} = T_{CP0} \left(\frac{U_H}{U_P} \right)^\gamma e^{-0.07(t_0 - t_H)}, \quad (1.8)$$

где U_H - номинальное напряжение;
 U_P - реальное напряжение;
 t_0 - температура окружающей среды, °С;
 t_H - номинальная температура среды °С;
 T_{CP0} - средний срок службы при номинальном напряжении и температуре окружающей среды $t_{00}=t_{H0}$;
 $\gamma = 2 \div 4$ - постоянная, определяемая из опыта для данного типа конденсаторов.

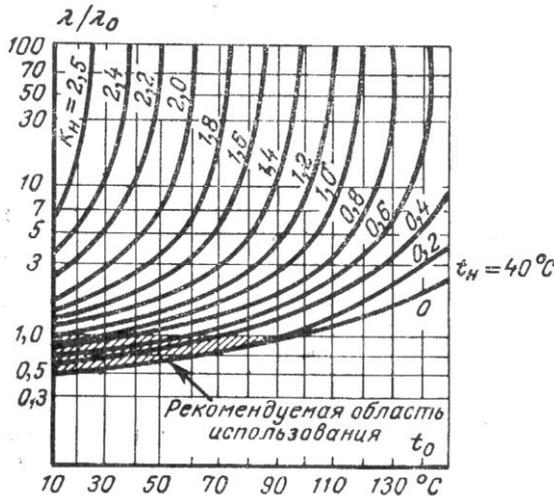


Рис. 1.4. Расчетные зависимости интенсивности отказов композиционных резисторов от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки

За счёт увеличения реального напряжения или температуры окружающей среды возможно ускорение процесса испытаний конденсаторов.

Мы привели примеры возможного осуществления ускоренных испытаний при вполне определенных воздействующих факторах только для ряда радиоэлементов.

Установление подобных зависимостей для всех элементов при воздействии различных факторов является одной из первоочередных задач. Когда ускоренные испытания элементов не являются разрушающими, а время их проведения мало, их целесообразно вводить в технологический процесс.

1.6. Испытания на повреждающую нагрузку

Испытания на повреждающую нагрузку имеют целью оценить стойкость элементов (деталей и узлов), а иногда и приборов к внешним воздействиям. Поскольку в ходе испытаний выявляются «слабые» элементы со скрытыми дефектами, то иногда эти испытания называют «поиском критической слабости». При этом методе испытаний нагрузка (внешнее воздействие) увеличивается постепенно до момента возникновения отказа испытываемого элемента (аппарата). Величина нагрузки фиксируется как в процессе ее увеличения, так и в момент отказа.

Иногда, при наличии большого запаса надежности, элементы и аппараты выдерживают нагрузку, во много раз превышающую максимальную, имеющую место при реальной эксплуатации. Эмпирически установлено, что испытания следует прекращать после того, как прибор и система выдержит четырехкратное превышение максимально допустимого значения нагрузки. В ряде случаев возникновение отказа не приводит к окончательному выходу из строя элемента прибора, и он после снятия нагрузки и устранения отказа оказывается вновь работоспособным.

Как указывалось, отличие испытаний на повреждающую нагрузку от испытаний на срок службы заключается в различной длительности испытаний.

При испытаниях на повреждающую нагрузку время безотказной работы не фиксируется и не исследуется. Для исключения побочного влияния длительности времени испытаний его стараются сокращать. Как правило,

испытаниям на повреждающую нагрузку чаще всего подвергают элементы приборов и систем кратковременного и однократного действия, так как они работают в более тяжелых режимах.

Испытания на повреждающую нагрузку позволяют получить сведения о возможности использования элементов приборов при определенной нагрузке, но по их результатам нельзя определить характеристики надежности.

При испытаниях узлов и приборов необходимо быть уверенным, что используемые в них детали обладают требуемой надежностью. Возможность возникновения скрытых дефектов в деталях из-за их несовершенства маскирует и осложняет анализ причин возникновения отказов.

Элементы приборов и систем могут испытываться на одиночную и комплексную нагрузку. Чем большее количество нагрузок действует одновременно, тем условия испытания ближе к эксплуатационным. Однако принято, что повреждающая нагрузка выбирается только одна. Она действует одновременно с другими нагрузками нормального уровня.

Для удобства фиксации интенсивности нагрузок и параметров элементов приборов, а также с целью обеспечения времени установления стационарного режима повреждающая нагрузка увеличивается скачкообразно с выдержкой после каждого скачка. Величина выдержки (Δt) зависит от характера нагрузки. Величина скачка нагрузки (Δx) устанавливается экспериментально (рис. 1.5).



Рис.1.5. Программа испытаний на повреждающую нагрузку

Для ускорения процесса испытаний величину скачка целесообразно брать большой, однако при этом возрастает вероятность увеличения ошибки при определении величины повреждающей нагрузки.

Пользуясь данными испытаний, строят гистограмму распределения повреждающей нагрузки. Для этого сначала составляют табл. 1.2, называемую статистическим рядом.

Таблица 1.2

I_i	$x_1; x_2$	$x_2; x_3$	$x_i; x_{i+1}$	$x_k; x_{k+1}$
p_i	p_1	p_2	p_i	p_k

В табл. 1.2 весь диапазон наблюдаемых значений x представлен разбитым на интервалы или «разряды». В таблице приняты обозначения: I_i – обозначение i -го разряда; x_i, x_{i+1} – границы разряда; k – число разрядов; p_i – частота отказов.

В данном случае под частотой отказов будем понимать вероятность отказов элементов q_i

$$q_i = \frac{n_i}{N}, \quad (1.9)$$

где N —начальное число испытываемых элементов;

n_i - число отказавших элементов в данном разряде.

Для построения гистограммы (рис. 1.6) по оси абсцисс откладывают разряды (x_i, x_{i+1}), полагая, что все разряды по длине одинаковы, а по оси ординат – вероятность отказов элементов q_i . За начало отсчета принимают значение нагрузки, при котором q_i максимальна. Вправо и влево от данного значения отложены разряды больших и меньших нагрузок, при которых вероятность отказа уменьшается.

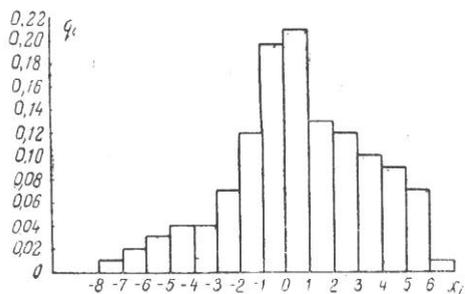


Рис. 1.6. Гистограмма распределения повреждающей нагрузки

Полная площадь построенной гистограммы равна единице. При увеличении числа интервалов (скачков) разряды становятся мельче, гистограмма приближается к кривой, ограничивающей площадь, равную единице. Эта кривая, представляющая собой график плотности распределения величины x , называется кривой распределения.

Как показывает опыт, повреждающие нагрузки чаще всего распределены по нормальному закону. Знание закона распределения позволяет ориентировочно указать интервал практически возможных значений случайных нагрузок (правило трех сигм).

Имея статистические данные величины повреждающей нагрузки и кривую распределения, вычисляют параметры закона распределения: среднюю повреждающую нагрузку (математическое ожидание)

$$M[\bar{X}] = \sum_{i=1}^n x_i p_i, \quad (1.10)$$

где x_i - дискретная случайная величина нагрузки, имеющая возможные значения x_1, x_2, \dots, x_n с вероятностями p_1, p_2, \dots, p_n , и среднее квадратичное отклонение повреждающей нагрузки от среднего значения

$$\sigma_x = \sqrt{D[\bar{X}]}, \quad (1.11)$$

$$D[\bar{X}] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i,$$

где D - дисперсия случайной величины нагрузки x.

Определение указанных выше параметров позволяет оценить некоторое среднее значение M и степень рассеивания m_x возможных случайных величин $\sigma[\bar{X}]$ около него.

1.7. Статистические испытания

Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) заключается в том, что при помощи многократных случайных испытаний (вычислений, производимых над случайными числами) определяют вероятность появления некоторого случайного события (математического ожидания случайной величины).

Данный метод позволяет определить характеристики надежности исходя из предположения, что известен механизм образования отказов при различных сочетаниях значений параметров приборов, выбираемых случайным образом согласно заданной статистической модели. Применение этого метода позволяет путем многократного моделирования случайного процесса определить искомую величину. Решение поставленной задачи стало возможным только с появлением ЭВМ, позволяющих за короткое время произвести оценку влияния различных изменений параметров элементов на выходные параметры приборов и системы. Для нахождения этого решения необходимо знание граничных параметров элементов, определяющих пределы работоспособности прибора и системы.

Статистическим испытаниям могут подвергаться как математические, так и физические модели приборов и

системы. Метод статистического испытания математической модели базируется на знании уравнений, связывающих входные параметры (x_1, x_2, \dots, x_n) с выходными параметрами испытываемого устройства (y_1, y_2, \dots, y_n). Эти уравнения могут быть выведены на основании изучения конкретного прибора и ее внутренних функциональных связей, после чего осуществляют формализацию (математическое описание установленных связей с учетом воздействия различных факторов на приборы). Формализация заключается в составлении математических зависимостей, определяемых структурами элементов приборов и характером их функционирования. При этом необходимо правильно выбрать основные факторы, влияющие на функционирование ЭА. Увеличение числа учитываемых факторов приводит к усложнению моделирования приборов и систем. Выбрав параметры (x_1, x_2, \dots, x_n), характеризующие процессы функционирования системы и необходимые для оценки ее эффективности, и полагая, что работоспособность прибора определяется набором параметров $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, построим модель процесса, определяющего вероятность попадания параметра $y=f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, где $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ - случайные величины, обладающие заданным распределением в области работоспособности А:

$$P_{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n}(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1.12)$$

Далее разрабатывают алгоритмы, моделирующие процессы функционирования прибора. Алгоритмы (системы правил) определяют последовательность операций (аналитических или логических), выполняемых с целью получения численных величин параметров эффективности. Алгоритмы записываются в виде математических формул, схем или при помощи логического, описания. В данном случае алгоритмы функций должны обеспечивать получение совместного распределения (9) при известных распределениях случайных чисел a_1, a_2, \dots, a_n , которые могут быть взяты из

специальных таблиц или получены с помощью специальных датчиков. Таким образом, выходной параметр, характеризующий работоспособность прибора и системы, оказывается функцией случайных чисел: $y = y(a_1, a_2, \dots, a_n)$.

Осуществляя N независимых реализации (испытаний) последовательности случайных чисел a_1, a_2, \dots, a_n :

$$\begin{aligned} & a_1^{(1)}, \dots, a_m^{(1)}; \\ & a_1^{(2)}, \dots, a_m^{(2)}; \\ & \dots \\ & a_1^{(N)}, \dots, a_m^{(N)}, \end{aligned}$$

Вычисляют для каждой из них значения $y_i = y(a_i, 1 \leq i \leq N)$. Поскольку обработка числовых результатов является весьма трудоемкой, то процесс вычислений целесообразно автоматизировать, для чего разработанные алгоритмы программируются, т. е. предусмотренные ими операции представляются в системе определенных команд, которые позволяют произвести все расчеты с помощью ЭВМ.

По результатам N испытаний оценивают вероятность попадания параметра y в область A .

При числе попаданий K в область A

$$P(A) = \frac{K}{N}, \quad (1.13)$$

Установлено, что погрешность испытаний имеет порядок

$$\delta \sim \frac{1}{\sqrt{N}}, \quad (1.14)$$

Если значения случайных величин имеют распределение по нормальному закону, то погрешность, даваемая методом Монте-Карло, имеет вид:

$$\delta = \frac{3\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (1.15)$$

где σ - среднее квадратичное отклонение.

Повышение точности результатов испытаний достигается увеличением числа испытаний (N). Данный метод позволяет использовать сколь угодно сложную математическую модель испытываемого устройства, достаточно полно отражающую физику его работы и уменьшающую погрешности, свойственные расчетным методам. Математическая модель может, быть дана в виде системы частных аналитических зависимостей отдельных выходных параметров схемы от входных в виде экспериментально полученных графиков, таблиц и т. п. Применение данного метода испытаний позволяет сконструировать более надежные приборы и системы и отказаться от ряда сложных лабораторных испытаний. Недостатками метода являются необходимость наличия ЭВМ, обладающей большим быстродействием; определение основных соотношений, получаемых в результате больших предварительных теоретико-экспериментальных исследований, характеризующих математическую модель устройства; знание вероятностных характеристик входных (первичных) параметров.

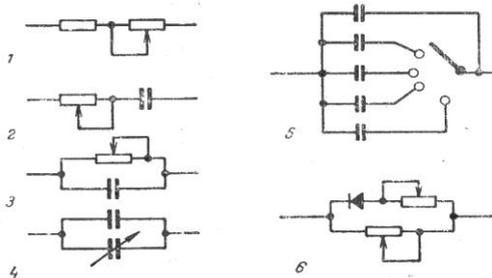


Рис. 1.7. Схемы макетов элементов

- 1 - резистор; 2,3 – конденсаторы постоянной емкости;
4,5 – конденсаторы переменной емкости; 6 – диод

Метод статистических испытаний физическим моделированием прибора предусматривает проведение испытаний на реальных аппаратах или на электронных моделях. При испытаниях на реальных аппаратах производят исследование процессов возникновения отказов в приборах и их последствий путем искусственного введения в схему обрывов, коротких замыканий или установки элементов несоответствующих номиналов. Проведение испытаний на электронных моделях заключается в том, что определенные элементы схемы заменяются физическими моделями, позволяющими изменять величины характеризующих их параметров. Так, например, на рис. 1.7 приведены схемы макетов элементов, позволяющие имитировать различные сопротивления резисторов с помощью переменных резисторов, различные емкости и потери с помощью переменных конденсаторов и резисторов, разброс полупроводниковых диодов с помощью переменных резисторов.

Моделирование различных элементов осуществляют на специальных стендах, позволяющих воспроизводить случайные процессы изменения параметров элементов. Для получения случайных процессов изменения напряжений, управляющих параметрами элементов, используют специальные генераторы случайных процессов. Достоинством данного метода является то, что отпадает необходимость в математической модели, связывающей выходные параметры с входными (первичными). Указанная связь реализуется непосредственно в физической модели.

Недостатками метода являются техническая сложность выполнения физических моделей ряда устройств (например, высокочастотных, импульсных и т. д.), высокая стоимость стендов для проведения испытаний из-за их сложности и большой трудоемкости. Рассмотренные статистические методы испытаний могут применяться как для моделирования процессов, происходящих внутри прибора, так и для

моделирования внешних воздействий, которым подвергается прибор во время эксплуатации. При этом считают, что внешние воздействия определяются обслуживающим персоналом и условиями работы прибора и системы. Для оценки процессов обслуживания, помимо статистических методов испытаний, применяют метод, называемый теорией массового обслуживания, а также составляются дифференциальные уравнения, отражающие динамику технического обслуживания.

1.8. Граничные испытания

Все виды испытаний и исследований, применяемые для предсказания места и времени появления постепенного отказа элемента прибора, основанные на определении связи граничных значений параметров элементов с работоспособностью и надежностью прибора, принято называть граничными испытаниями.

Пользуясь методом граничных испытаний возможно еще в процессе разработки прибора выбрать оптимальные варианты схем, параметры их элементов и режимов. Граничные испытания являются экспериментальным методом, основанным на физическом моделировании области значений первичных параметров, при которых выходные параметры устройства находятся в пределах допуска.

Проведение граничных испытаний складывается из следующих этапов:

1. Определение критериев отказа ЭА исходя из условий работы и в соответствии с техническим заданием.

2. Определение границ работоспособности и надежности прибора и системы, выполненных из элементов с номинальными параметрами, в зависимости от изменений напряжения питания, внешних условий, параметров входных сигналов.

3. Определение границ работоспособности и надежности приборов и систем, работающих в нормальных условиях

(номинальные напряжения питания, параметры входных сигналов и внешние условия), в зависимости от разброса параметров элементов прибора.

Для осуществления граничных испытаний необходимо имитировать изменение параметров различных схемных элементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, электронных и полупроводниковых приборов), влияющих на работоспособность прибора и системы. Наиболее часто в качестве граничного параметра в данном методе выбирают одно из питающих напряжений (параметр граничного испытания), которое используется для имитации изменений параметров элементов схемы (например, резисторов).

Изменение параметров конденсаторов и катушек индуктивности имитируют последовательно-параллельным включением этих элементов. Имитацию изменения прямого и обратного тока полупроводниковых приборов осуществляют последовательным или параллельным включением в схему дополнительных резисторов соответствующих номиналов.

Наибольшую сложность представляет имитация изменения параметров транзисторов и электронных ламп, так как они характеризуются сложной совокупностью параметров. В этих случаях подбирают группу элементов с одинаковыми параметрами, за исключением одного элемента, параметры которого изменяют в нужном направлении. Так, например, амплитуду напряжения сигнала на выходе лампового усилителя можно имитировать изменением напряжения анодного питания.

Рассмотрим определение границ исправной работы прибора. Изменяя напряжение граничного испытания до момента отказа схемы при номинальных значениях параметров всех элементов, определим напряжение отказа $U_{гр0}$. Затем, изменив один из параметров рассматриваемого элемента, определим, при каком новом значении $U_{гр}$ возникнет отказ. Очевидно, что при разных значениях параметра ($x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$) элемента отказы схемы будут

возникать при различных напряжениях.

Таким образом, можно установить, что определенному отклонению напряжения граничного испытания $\Delta U_{гр} = U_{грi} - U_{гр0}$ соответствует определенное значение ΔX - отклонение параметра элемента от номинала.

По данным испытаниям строят график зависимости отклонения напряжения граничного испытания до отказа схемы (рис. 1.8).

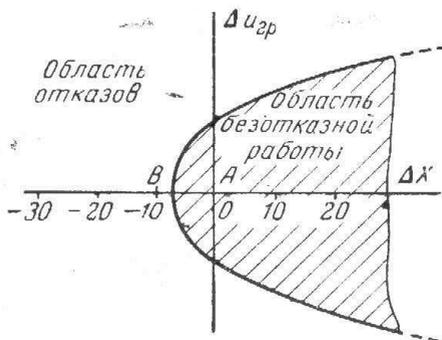


Рис. 1.8. График граничного испытания

Из графика следует, что кривая является границей, отделяющей область безотказной работы от области отказов, что и привело к названию - метод граничных испытаний. Следует отметить, что вид графика граничного испытания имеет существенное значение для возможности его использования. При выборе напряжения граничного испытания необходимо, чтобы изменение величины параметра обеспечивало малый и плавный наклон кривой к оси отклонения параметра элемента (рис. 1.9).

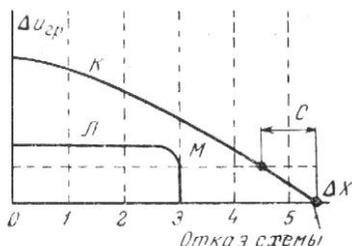


Рис. 1.9. Предсказание отказа при граничном испытании

Если при изменении указанного напряжения линия граничного испытания сначала остается постоянной, а затем резко падает до нуля, исключается возможность получения своевременной информации о приближении отказа и возникает необходимость нового подбора напряжения граничного испытания. В большинстве случаев при изменении параметров граничных испытаний в широких пределах контур безотказной работы оказываются замкнутым (рис. 1.10).

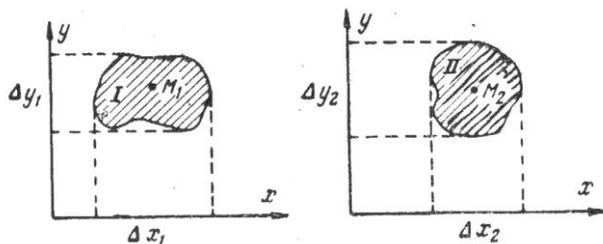


Рис. 1.10. Возможный вид замкнутого контура области безотказной работы

Знание графиков граничных испытаний позволяет определить «запас прочности» схемы, правильно выбрать номиналы параметров и режимы элементов схемы, предсказать появление постепенных отказов, а также сравнить надежность идентичных схем по площадям безотказной работы.

Выбор номинала параметра часто заключается в определении рабочей точки (М) в центре области безотказной работы. Однако возможны случаи, когда выбор такого положения рабочей точки окажется неверным. Так, например, при дрейфе параметра элемента в определенном направлении необходимо предусматривать сдвиг рабочей точки в противоположном направлении. Обычно график граничных испытаний снимают при условии, что параметры всех схемных элементов, кроме подвергаемого испытанию, фиксированы. В реальных условиях изменения параметров сильно взаимосвязаны между собой и сдвиг параметра одного элемента может вызвать опасный с точки зрения надежности сдвиг другого. Поэтому при осуществлении граничных испытаний РЭА приходится проводить большой объем работы по определению областей безотказной работы ряда элементов. Полученные области накладывают друг на друга и окончательно область безотказной работы определяется общим геометрическим местом точек для всех областей (рис. 1.11).

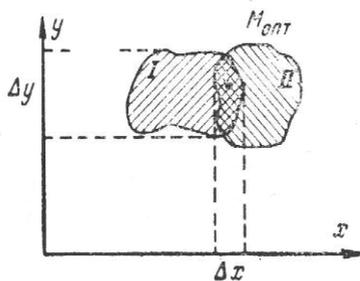


Рис. 1.11. Определение области безотказной работы схемы

Возможны два способа проведения испытания. При первом способе, изменяя напряжение общего источника питания, определяют момент отказа ЭА и отказавший элемент. Однако в сложных ЭА, содержащих различные схемы с разными величинами отклонений напряжения от номинального значения, это приводит к следующим

недостаткам: невозможности обнаружения отказа более надежных схем за счет отказа малонадежных; выходу из строя схем, рассчитанных на малые напряжения и не контролируемых при данных испытаниях; возможности возникновения междукаскадной связи, приводящей к ошибочным результатам.

При втором способе сложные ЭА разбивают на группы, каждая из которых имеет свою линию граничного испытания. Возможно выделение следующих групп:

а) группа напряжений, объединяющая линии с общими пределами изменения напряжения;

б) группа схем, объединяющая схемы, проверяемые при одном отклонении напряжения;

в) группа индивидуальных линий, когда ЭА испытывается поочередной подачей на каждую линию питания определенного напряжения. При этом к не испытываемым линиям питания ЭА подают номинальные напряжения. Если перед испытаниями был известен запас надежности, то устанавливают величину напряжения, не превышающую это значение.

Отсутствие отказа при напряжении запаса надежности свидетельствует о том, что вместо граничных испытаний была проведена граничная проверка работоспособности.

Сложность современных ЭА приводит к необходимости использования для граничных испытаний специальных автоматов. В заключение отметим достоинства метода граничных испытаний; к ним относится возможность получения информации о надежности ЭА на этапе проектирования, удобство выбора оптимального рабочего режима, сокращение объема испытаний на внешние воздействия, возможность сравнения различных схем с точки зрения их надежности.

Недостатками метода граничных испытаний являются невозможность количественной оценки надежности; трудоемкость проведения экспериментов, исключаяющая возможность получения данных об изменении выходных

параметров ЭА при изменении комплекса внешних воздействий и взаимодействии элементов; отсутствие четких правил по проведению граничных испытаний и анализу их результатов; недостаточная эффективность из-за возможности маневрирования только одним параметром при всех прочих фиксированных.

1.9. Матричные испытания

Широкое применение граничных испытаний оказывается практически невозможным из-за того, что каждый параметр какого-либо элемента или ЭА связан сложной функциональной зависимостью с остальными параметрами элемента или схемы, а также зависит от влияния различных внешних факторов. Метод матричных испытаний, являющийся дальнейшим развитием граничных испытаний, заключается в том, что при испытании осуществляют моделирование рабочей области радиоустройства при всех возможных значениях первичных параметров, находящихся в пределах допусков. Для моделирования параметров схемы, лежащих в границах, предусмотренных техническим заданием, составляют матрицу состояний (матрицей называют систему T_n чисел, расположенных в прямоугольную таблицу из T строк и n столбцов). В общем случае работоспособность и надежность ЭА зависят от большого числа параметров элементов схемы и внешних факторов, воздействующих на величину этих параметров. Для удобства ограничимся рассмотрением матричных испытаний устройства, работоспособность которого зависит лишь от двух параметров, и имеется необходимая информация о характере случайных воздействий, о сигнале и некоторых других закономерностях. Условимся все параметры, от которых зависит работа ЭА, называть определяющими и считать, что диапазон их возможных значений ограничен интервалами $(X_{1\text{мин}}, X_{1\text{макс}})$, $(X_{2\text{мин}}, X_{2\text{макс}})$.

Эти интервалы определяются допусками в соответствии

с техническими требованиями, предъявляемыми к ЭА и его элементам. Разобьем эти интервалы на одинаковые участки (кванты), число которых соответственно будет $l(1)$ и $l(2)$. Значения параметров, соответствующие серединам участков будем называть представителями квантов. Состояние РЭА, при котором определяющие параметры находятся в заданном кванте и принимают значения представителя кванта, называют ситуацией состояния схемы. При двух параметрах, определяющих работоспособность схемы, число возможных ситуаций ЭА равно:

$$N_2 = l^{(1)}l^{(2)}, \quad (1.16)$$

Индекс 2 при N означает, что рассматривается двумерный случай, т. е. имеются два определяющих параметра. В общем случае при n определяющих параметрах число возможных ситуаций равно:

$$N = \prod_{j=1}^n l^{(j)}, \quad (1.17)$$

Каждая ситуация состояния соответствует определенным значениям параметров элементов. Под действием различных причин изменяются параметры и ситуации. Для учета одновременного изменения всех определяющих параметров пользуются последовательностью ситуаций $a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_m$. С целью моделирования возможных состояний составим матрицу ситуаций:

$$\|a\| = \left\| \begin{array}{c} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1k}^{(1)}, \dots, a_{1l}^{(1)} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2k}^{(2)}, \dots, a_{2l}^{(2)} \\ \vdots \\ a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jk}^{(j)}, \dots, a_{jl}^{(j)} \\ \vdots \\ a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nk}^{(n)}, \dots, a_{nl}^{(n)} \end{array} \right\|, \quad (1.18)$$

где первый индекс при a характеризует параметр, а второй показывает какому кванту данного параметра он принадлежит.

Наличие матрицы комбинаций случайных величин, характеризующих входные параметры ЭА, позволяет численным методом определить возможные реализации случайных значений входных параметров. Перебор всех возможных ситуаций для данного устройства может быть осуществлен путем приведения матричных испытаний, а также методом физического моделирования. Очевидно, что некоторые из ситуаций будут отказными, последовательность которых обозначим:

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_\mu, \dots, \omega_\gamma.$$

Знание вероятности появления отказных ситуаций $P_1(t)$, $P_2(t)$, ..., $P_\gamma(t)$, позволяет определить область работоспособности. Вероятность того, что в момент времени t схема окажется неработоспособной, выразится так:

$$P(t) = \sum_{\mu=1}^{\mu=r} P_\mu(t), \quad (1.19)$$

Вероятность работоспособности схемы в момент включения можно определить, предположив $t=0$. В этом случае вероятность отказа схемы после сборки ($P_{сб}$) определится:

$$P_{сб} = P(0) = \sum_{\mu=1}^{\mu=r} P_\mu(0), \quad (1.20)$$

Итак, в случае знания законов «старения» отдельных элементов схемы и начального значения вероятности постоянных отказов $P_{сб}$ можно определить вероятность появления отказных ситуаций $P(t)$.

С целью некоторого уменьшения трудоемкости матричных испытаний, возможно, производить перебор не всех несовместных ситуаций устройства N , а только части N_m ,

выбираемых в соответствии с методом Монте-Карло по случайному закону.

Необходимое число испытаний N_m при заданной достоверности $1 - \alpha$ и ошибки испытаний ε может быть определено из соотношения

$$N_m \cong \frac{l-1}{\varepsilon^2} \ln \frac{nl}{2\alpha}, \quad (1.21)$$

где n - общее число определяющих параметров РЭА $|x_j|$, $j = 1, 2, \dots, n$;

l - число участков (квантов), на которые разбит диапазон изменения параметров ($x_{j\text{мин}}$, $x_{j\text{макс}}$).

Предполагается, что для всех параметров прибора и системы диапазон разбивается на одинаковое число участков $l(1)=l(2)=\dots=l(j)=l$, каждый из которых представлен в испытаниях равной вероятностью. На конкретном примере можно показать, что применение метода Монте-Карло сокращает объем испытаний по сравнению с методом последовательного перебора. Так, например, при $l=4$, $\alpha=0,05$ и $\varepsilon=0,01$ получаем:

Таблица 1.3

n	10	15	20
N_m	$3,6 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^5$
N	106	109	1012

Табл. 1.3 показывает, что при числе определяющих параметров $n=20$ необходимое число испытаний N_m при применении метода Монте-Карло в $25 \cdot 10^5$ раз меньше.

Совместное применение статистического и матричного методов испытаний значительно сокращает объем испытания, позволяет использовать не математическую, а физическую модель РЭА, с помощью которой можно проследить случайные изменения параметров в соответствии с определенным статистическим законом. Значительная

трудоемкость матричных испытаний привела к необходимости разработки и применения специальных приборов, позволяющих автоматизировать процесс испытаний. Эти приборы (автоматы) позволяют в соответствии с матрицей ситуаций автоматически переключать элементы, реализующие значения представителей квантов, определяющих параметры испытуемого прибора и системы, т. е. осуществлять перебор ситуаций; проверять работоспособность прибора в каждой ситуации в соответствии с заданными критериями отказа; регистрировать количество и характер отказов.

В настоящее время в России группой инженеров разработан автомат статистических и матричных испытаний, позволяющий оценивать вероятность безотказной работы прибора в определенный момент времени, а также осуществлять оптимизацию надежности схемы путем выбора оптимальных значений, определяющих параметры.

Достоинством метода матричных испытаний является возможность оптимизации надежности прибора и системы, т. е. возможность получения информации о степени надежности прибора и системы (соотношение отказных и не отказных ситуаций в пределах рабочей области). К недостаткам метода, ограничивающим его применение, относятся отсутствие информации о соотношении рабочей области и области функционирования, исключающей оценку запаса надежности, а также невозможность количественной оценки надежности.

Следует отметить, что автоматы матричных испытаний хотя и ускоряют процесс перебора ситуаций, но весьма сложны и трудоемки в наладивании.

1.10. Испытания приборов и систем в процессах проектирования и производства

Приборы и средства подвергаются испытаниям как в процессах производства и эксплуатации, так и в процессе проектирования. Процесс проектирования приборов и систем,

и ее элементов в основном складывается из научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских (ОКР) работ.

В ходе НИР разрабатывают техническое задание, в котором устанавливают основные параметры приборов и условия его эксплуатации. Кроме того, выполняют прикидочный расчет надежности, определяют основные параметры элементов, изготавливают и испытывают экспериментальные образцы. Испытания образцов производят с целью определения направления последующих конструкторских работ по их усовершенствованию. В заключение испытаний оформляются протоколы и на основании приводимых в них выводов, разрабатывается проект методики проведения испытаний на последующих этапах. На основании полученных при выполнении НИР данных приступают к проведению ОКР.

Первоначальным этапом ОКР является эскизный проект, в процессе выполнения которого осуществляют лабораторные испытания макета прибора и системы. В заключение эскизного проекта даются рекомендации по объему и методике испытаний, разрабатываются технические задания на испытательное и измерительное оборудование.

Следующим этапом является технический проект, в ходе которого изготавливают опытные образцы, подвергающиеся испытаниям с целью выявления ошибок проектирования, определения слабых мест, которые могут приводить к недостаточной надежности прибора, а также установления и проверке допусков. При этом образцы прибора и системы должны испытываться в условиях, соответствующих реальным условиям эксплуатации.

Заключительным этапом ОКР является изготовление опытной партии. На этапе опытного производства испытывают образцы опытной партии: проектируют и изготавливают контрольно-испытательное оборудование. При проведении испытаний опытной партии необходимо иметь комплект конструкторских документов, предусмотренный

специальной ведомостью (МН СЧХ). Испытания образцов опытной партии подразделяются на две стадии: а) предварительные и б) государственные испытания.

В ходе предварительных испытаний устанавливают соответствие образцов опытной партии предъявляемым к ним требованиям. Предварительные испытания могут осуществляться на специальных стендах (стендовые или лабораторные испытания) и непосредственно после установки прибора и системы на объект. Стендовые испытания проводятся комиссией в соответствии с требованиями ТУ и по специальной программе испытаний (ПИ).

Государственные испытания проводятся с целью полной проверки соответствия опытных образцов заданным условиям и решения вопроса о целесообразности запуска прибора в серийное или массовое производство. При анализе результатов испытаний опытных образцов (партий) целесообразно разделять все отказы по принятой классификации и после выяснения причин их возникновения принимать действенные меры, обеспечивающие повышение надежности.

Объем проводимых испытаний зависит от сложности прибора и требований к его надежности. В большинстве случаев, чем сложнее прибор и система, и выше требования, тем больше объем испытаний. Обычно проводят испытания на соответствие всем пунктам ТТ и ТУ. Результаты испытаний оформляются специальным протоколом, к которому прилагается программа и методика проведения испытаний, а также перечень испытательного и измерительного оборудования.

Эта и другая техническая документация совместно с утвержденным актом приемки ОКР передаются предприятию - изготовителю установочной серии. После изготовления установочной серии специальная комиссия осуществляет ее приемку, в ходе которой в соответствии с ТУ производятся испытания образцов. Одновременно с изготовлением установочной серии, изготавливают все контрольно-

испытательные установки и стенды, составляют на них всю необходимую документацию (описания, инструкции по эксплуатации и т. д.), укомплектовывают их всей необходимой измерительной аппаратурой.

По результатам приемки установочной серии оформляется акт, после утверждения, которого считают, что производство подготовлено к серийному или массовому выпуску приборов.

Испытания, проводимые на стадиях серийного или массового производства, подразделяются на: приемосдаточные, периодические (типовые) и проверочные.

Приемосдаточные (контрольные) испытания проводятся при сдаче заводом-изготовителем аппаратуры или ее элементов заказчику. Если испытания производятся без представителя заказчика, то их называют приемными.

Испытаниям подвергают аппаратуру или элементы, предварительно проверенные отделом технического контроля (ОТК) предприятия. Объем и последовательность испытаний предусматривается ТТ или ТУ, а также программой испытаний (ПИ). Возможна 100%-ная и выборочная проверка параметров предъявленной к сдаче аппаратуры. При 100% испытаниях, отказавшие ЭА возвращаются для исправления, в то время как остальные ЭА продолжают испытывать.

При выборочных испытаниях отказ хотя бы одного из отобранных приборов приводит к возвращению всей партии для ее повторной проверки ОТК и необходимому исправлению.

Периодические (типовые) испытания имеют целью установить соответствие электрических и других параметров ЭА параметрам ТУ или ТТ в нормальных условиях, а также при различных механических и климатических воздействиях. Периодичность и количество аппаратов или элементов, подвергающихся типовым испытаниям, определяются ТУ или ТТ.

Как правило, периодические испытания проводят не реже одного раза в год. В ряде случаев (освоение новых

приборов, освоение приборов на новом производстве) периодические испытания могут производиться ежемесячно или раз в три месяца. Периодическим испытаниям принято подвергать приборы и системы, отобранные из числа прошедших приемо-сдаточные испытания, причем испытывают не все отобранные приборы и системы, а оставляют часть (две трети) на случай, если возникнет необходимость проведения повторных испытаний.

Проверочные испытания - сокращенные испытания, проводимые с целью определения соответствия параметров прибора и системы требованиям ТУ или ТТ в случаях каких-либо схемных, конструктивных или технологических изменений. Количество приборов, подвергающиеся испытаниям, устанавливается индивидуально. При проведении проверочных испытаний проверке подлежат те параметры, на которые могли оказать влияние внесенные изменения. Испытания прекращаются после получения значения средней наработки на отказ T_{cp} больше заданной или при безотказной работе прибора в период времени прогона. Проверочные испытания проводят в процессе производства, а также при приемке опытных образцов.

Иногда для определения уровня надежности, соответствия выпускаемой заводом аппаратуры ТУ или ТТ осуществляют заводские испытания, проводимые в условиях, по возможности имитирующих реальную эксплуатацию. В процессе заводских испытаний выявляются надежность деталей и узлов и элементов, дефекты конструкции, качество сборки, монтажа и регулировки, а также устанавливают соответствие электрических параметров и количественных показателей, эксплуатационной надежности заданным нормам.

1.11. Методика составления программы испытаний

Высокие требования, предъявляемые к качеству современных приборов и систем, приводят к необходимости

проведения испытаний на надежность, позволяющих определить значения параметров надежности по установленной методике с целью оценки их соответствия требованиям ТУ. Как указывалось ранее, одним из источников информации о работоспособности и надежности приборов являются лабораторные испытания, имитирующие внешние воздействия, соответствующие реальным условиям эксплуатации. Поэтому разработка программы испытаний (ПИ) на надежность и методика их проведения являются ответственным мероприятием.

Основной целью программы испытаний является получение данных для введения необходимых изменений в конструкцию, обеспечивающих повышение качества аппаратуры, а также получение оценки фактической надежности прибора и системы.

Когда необходимо получить справочные данные о количественных показателях надежности и об их зависимости от времени и степени жесткости воздействующих факторов, производят специальные испытания на надежность, получившие название определительных. Точность оценки показателей надежности зависит от объема испытаний (количества испытываемых образцов и продолжительности испытаний). При разработке программы испытаний необходимо учитывать, в каком виде желательно получить результат испытаний: либо в виде случайного события – положительный исход или отказ, либо в виде количественной величины, характеризующей определенные электрические параметры прибора. Также необходимо учитывать, является ли испытываемая аппаратура однократного или многократного действия.

В основу разработки программы испытаний должны быть положены вероятностные и статистические методы, позволяющие обеспечить научно обоснованное планирование испытаний и оценку их результатов. Для определения количества испытываемых образцов и продолжительности испытаний необходимо знание законов распределения

отказов. Принято считать, что для сложной аппаратуры многократного действия внезапные и постепенные отказы следуют экспоненциальному закону распределения, а для аппаратуры однократного действия биномиальному закону.

При разработке программы испытаний необходимо исходить из классификации изделий по функционально-конструктивному признаку, в соответствии с которым все изделия делятся на классы деталей, узлов, приборов, комплектов и систем. С точки зрения испытаний указанные классы изделий можно объединить в две группы: I или низшая группа, объединяющая изделия, не имеющие самостоятельного эксплуатационного назначения (детали, узлы, блоки), и II или высшая, группа, объединяющая изделия, имеющие самостоятельное эксплуатационное назначение - это приборы (радиоприемники, телевизоры и т. п.) и системы (установки, станции и т. д.).

Решение вопроса о том, подвергать ли испытаниям изделия низшей или высшей группы, принимается конкретно для каждого случая.

Испытания изделий низшей группы требуют применения более простой, дешевой и менее габаритной испытательной аппаратуры, а также позволяют более быстро обнаружить слабые места изделий, так как на результаты испытаний не оказывают влияния другие взаимодействующие с ним элементы приборов. При этом возможно более быстрое принятие необходимых мер по усовершенствованию этих изделий и устранению обнаруженных неисправностей до момента окончания проектирования и изготовления всей системы.

В ряде случаев возможно использование для испытаний уже имеющейся контрольно-измерительной аппаратуры, предназначенной для испытаний идентичных изделий.

Испытания высшей группы изделий обеспечивают получение результатов учитывающих возможные взаимодействия различных блоков и частей прибора при меньшем объеме работ, так как для испытаний требуется

меньшее время и число образцов. Однако при выборе группы изделий для испытаний следует учитывать, что вероятность безотказной работы сложной системы равна произведению вероятностей безотказной работы ее элементов:

$$P_c = P_1 P_2 \dots P_N = \prod_{i=1}^N P_i, \quad (1.22)$$

где P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента;
 N – число элементов системы.

Отсюда следует, что для получения большого значения вероятности безотказной работы системы необходимо, чтобы входящие в нее элементы имели значительно более высокую вероятность безотказной работы. Таким образом, получение при испытаниях устойчивых значений P_1, P_2, \dots, P_N изделий низшей группы приводит к необходимости увеличения числа испытываемых изделий, а также продолжительности испытаний.

Решив вопрос об объекте испытаний, разрабатывают программу испытаний, которая должна предусматривать: 1) количество испытываемых изделий; 2) общую продолжительность испытаний и продолжительность испытаний при различных внешних воздействиях; 3) периодичность проведения испытаний; 4) состав и последовательность испытаний на внешние воздействия; 5) параметры испытательных режимов; 6) пределы изменения питающих напряжений и продолжительность работы изделий при этих напряжениях.

Периодичность проведения испытаний изделий зависит от того, к какой группе оно принадлежит. Периодичность проведения испытаний низшей группы обычно меньше, чем у высшей группы, но в обоих случаях она зависит от вида производства и количества изделий, выпускаемых за контролируемый период. Периодичность испытаний следует указывать в ТУ на изделие. К примеру, периодичность испытаний радиоизмерительных приборов определяется при

серийном производстве 3 – 5 годами, а для вновь внедряемых 1 – 2 годами. Отбор изделий для испытаний производится в порядке, предусмотренном ТУ из числа прошедших приемосдаточные испытания.

Состав и последовательность испытаний на внешние воздействия находятся в зависимости от условий эксплуатации и хранения. Очевидно, что не все внешние воздействия возможно имитировать, и они не всегда могут быть приложены совместно, как это бывает в реальных условиях. Поэтому необходимо установить, каким внешним воздействиям и в каких комбинациях должна подвергаться аппаратура, каков уровень их воздействия (целесообразно, чтобы он несколько превышал реальные воздействия), периодичность и последовательность смены указанных воздействий, продолжительность работы аппаратуры в различных режимах.

При определении последовательности испытаний следует исключать случаи, когда одни и те же изделия будут последовательно подвергаться различным уровням внешних воздействий, вызывающим необратимые ухудшения параметров, что затрудняет определение причины возникновения отказа. В ряде случаев может предусматриваться проведение на некоторых изделиях ускоренных или граничных испытаний, а иногда проведение испытаний в эксплуатационных условиях.

При определении состава испытаний необходимо учитывать возможности моделирования условий испытаний: наличие испытательных средств, расходы, связанные с проведением испытаний, наличие квалифицированного состава испытателей и т. д.

Параметры испытательных режимов устанавливаются в соответствии с действующими ГОСТ, нормами и техническими условиями на испытываемое изделие. Следует отметить, что на практике пользуются тремя видами норм на параметры. Предельные нормы, на которые рассчитывают изделия, приводятся в техническом отчете и по ним

испытания не производятся. Испытательные нормы, которые указывают в ТУ, отличаются от предельных на величину производственного допуска и по ним производят испытания в процессе производства. Эксплуатационные нормы, ниже испытательных указываются в ТУ, и только в пределах этих норм разрешается эксплуатация изделий. По этим нормам производятся испытания в процессе эксплуатации.

К программе испытаний должна прилагаться методика их проведения. При разработке методик проведения испытаний необходимо указывать, как должны производиться измерения, чтобы результаты были наиболее надежны и показательны.

В процессе проведения испытаний нужно вести учет и анализ отказов. При этом необходимо выяснить, чем объясняются отступления экспериментальных данных и характеристик от ожидаемых на основании теоретических расчетов. По результатам испытаний определяют предусмотренные в ТУ параметры прибора, количественные характеристики надежности, оценивают их соответствие заданным и разрабатывают рекомендации по их повышению. Все материалы по проведенным испытаниям оформляют в виде отчета, который должен содержать: программу и методику испытаний, и протокол испытаний с приложением.

Примерная форма протокола с характеристикой содержания его разделов приводится ниже.

Протокол испытаний (наименование объекта)

I. Объект испытаний:

Наименование объекта.

Чертежный номер (шифр).

Заводской номер.

Дата выпуска.

II. Цель испытаний:

1. Определение соответствия прибора и системы установленным в ТУ требованиям.

2. Определение количественных характеристик надежности и установление их соответствия заданным

нормам.

3. Выявление схемных, конструктивных и производственных дефектов, а также недостатков системы контроля качества.

4. Выявление ненадежных деталей, узлов, блоков и установление причин, вызывающих их неисправность и отказ.

III. Место и время испытаний.

Указывается наименование подразделения, проводившего испытания.

Время и дата начала и конца испытаний.

IV. Условия испытаний.

Испытания проводятся в соответствии со специально разработанной методикой на основании действующих ГОСТ, нормалей или другой централизованной документации.

V. Результаты испытаний.

1. Приводятся ведомости неисправностей (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Ведомость неисправностей

Ведомость неисправностей (отказов) _____ (наименование объекта)							
Чертежный номер (шифр) _____							
Дата начала испытаний _____							
Заводской номер _____							
Дата конца испытаний _____							
Дата выпуска _____							
Фамилия испытателя _____							
Наработка на отказ	Условия испытаний (тепло, холод, влага и т.д.)	Внешнее проявление неисправностей (отказа)	Причина неисправности (отказа)	№ отказавшего элемента по принципиальной схеме	Тип и номинал элемента	Характеристика вида отказа	Примечания

Примечание. Определение количественных характеристик надежности.

2. Дается количественная оценка надежности испытуемых изделий.

3. Анализируются результаты испытаний.

VI. Выводы и рекомендации по повышению надежности.

1.12. Определение продолжительности испытаний и количества испытываемых изделий

Основной задачей, которую необходимо решать при составлении программы испытаний, является определение продолжительности испытаний и размера выборки. В зависимости от вида (категории) испытываемого изделия и от того, какие параметры надежности необходимо определить, различают испытания с восстановлением и без восстановления. При испытаниях с восстановлением отказавшее изделие заменяется исправным и, таким образом, под нагрузкой находится неизменное число изделия. При испытаниях без восстановления отказавшие изделия не заменяются. В обоих случаях испытания могут проводиться до заранее установленного момента времени t_{Γ} (определяемого требованиями по надежности) или до момента t_n появления n -го отказа, если $t_n < t_{\Gamma}$, либо до заранее установленного момента времени t_{Γ} , если $t_n \geq t_{\Gamma}$.

Таким образом, возможны три варианта проведения испытаний на надежность по продолжительности восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий:

а) испытания, проводимые до установленного момента времени t_{Γ} ;

б) испытания, проводимые до момента появления n -го отказа;

в) испытания, проводимые либо до момента времени t_n появления n -го отказа, если $t_n < t_{\Gamma}$, либо до установленного момента времени t_{Γ} , если $t_n \geq t_{\Gamma}$.

Если на испытания ставятся N невосстанавливаемых изделий и за время испытаний отказывает p , то число изделий безотказно работающих до момента t будет $N(t) = N - p$. Суммарная наработка $S(t)$ в момент времени t определится как сумма времен, в течение которых безотказно работали испытываемые изделия:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n t_i + N(t)t, \quad (1.23)$$

где t_i - моменты отказов элементов $i = 0, 1, 2, \dots, n$.

При этом возможно еще два варианта испытаний: в первом задают величину суммарной наработки S_0 и испытания проводятся до момента t^* , при котором $S(t^*) = S_0$, или до момента отказа последнего N -го изделия $t_N = t^*$ при $S(t^*) \leq S_0$; во втором задают S_0 и продолжают испытания до момента t^* , который определяется как момент, когда впервые наступает одно из следующих событий: либо $S(t^*) = S_0$ и $n < r$, либо $t^* = t_r$, но $S(t^*) < S_0$, где t_r момент появления r -отказа.

Рекомендуется выбирать время t_r из следующего ряда 25, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 5000, 10000. Продолжительность испытаний каждого экземпляра аппаратуры или ее элементов может выбираться в k раз больше средней наработки на отказ T_0 или допустимого времени непрерывной работы, установленного для определенной категории аппаратуры. Выбор продолжительности испытаний существенно зависит от назначения аппаратуры (элементов). Иногда продолжительность испытаний или время, на которое задаются требования по надежности t_r и допустимое значение отказов, указывается в ТТ или ТУ на конкретное изделие, что несколько упрощает работу по составлению программы.

Сокращение времени испытаний может достигаться параллельным проведением различных видов испытаний отдельных групп изделий, а также осуществлением комбинационных испытаний на одновременное воздействие

нескольких факторов. Однако в первом случае это приводит к увеличению числа изделий, необходимых для испытаний, а во втором требует применения сложного оборудования. Кроме того, при комбинационных испытаниях исключается информация о воздействии отдельных факторов на изделие.

Определение количества изделий, необходимых для проведения испытаний (размера выборки), производится методами однократной или двукратной выборок. Под выборкой (выборочной совокупностью) понимают совокупность чисел $(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$, взятых наугад из некоторого распределения случайной величины x , с плотностью вероятности $\varphi(x)$. Совокупность чисел x называют генеральной совокупностью, а характеристику распределения $\varphi(x)$ генеральной характеристикой.

При нормальном распределении

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1.24)$$

где x_0 - генеральная средняя;

σ_2 —генеральная дисперсия.

Оцениваться следующими характеристиками:

выборочной средней

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1.25)$$

размахом выборки

$$\omega_n = x_{\max} - x_{\min}, \quad (1.26)$$

выборочным среднеквадратичным отклонением

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1.27)$$

Статистические испытания основываются на том, что о генеральной характеристике испытываемой партии изделий судят по выборочным характеристикам.

Очевидно, что при случайной выборке возможно возникновение различных ошибок в оценке партии изделий. Если в результате испытаний партия испытываемых изделий оценивается как негодная, то такую ошибку называют риском изготовителя (поставщика) α .

Если в результате испытаний негодная партия испытываемых изделий оценивается как годная, то такую ошибку называют риском заказчика (потребителя) β . Целесообразно, чтобы обе величины α и β были достаточно малыми (менее 0,05 – 0,1).

Для оценки степени годности изделий устанавливают три категории качества:

- 1) хорошее изделие, когда некоторый выборочный параметр $x_n \leq x_1$ - определенной постоянной величины;
- 2) допустимое изделие, когда $x_2 > x_n > x_1$ где x_2 - определенная постоянная величина;
- 3) брак $x_n \geq x_2$.

При применении метода однократной выборки от определенного количества выпущенных изделий производится одна случайная выборка определенного (n) объема по некоторому параметру x_n , отвечающему генеральному параметру всей партии изделий. Партия изделий принимается при условии $x_n \leq C$ и бракуется при условии $x_n > C$, где C – оценочный норматив. Оценочный норматив может иметь два значения. Если оценочный норматив характеризует наименьшее число отказавших изделий в выборке, при котором результаты испытаний считаются отрицательными, то его называют браковочным числом C . Если оценочный норматив характеризует

наибольшее число отказавших изделий в выборке, при котором результаты испытаний считаются положительными, то его называют приемочным числом C .

Пользуясь введенными определениями, получаем, что вероятности риска изготовителя (α) и риска заказчика (β) могут быть записаны в виде следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= P(x_n > C' \quad \text{при} \quad x_0 = x_1) \\ \beta &= P(x_n \leq C \quad \text{при} \quad x_0 = x_1) \end{aligned} \right\}, \quad (1.28)$$

где x_1 и x_2 - некоторые постоянные уровни качества.

Для характеристики уровня качества изделий устанавливают два уровня надежности: минимальное (P_2) и приемлемое (P_1) значения вероятности безотказной работы. Минимальное значение вероятности безотказной работы изделия (P_2) характеризует вероятность приемки, равную риску заказчика β . Приемлемое значение вероятности безотказной работы изделия (P_1) характеризует вероятность забраковывания, равную риску изготовителя. В обоих случаях предполагается, что указанные величины задаются на время (t_T), предусмотренное требованиями по надежности изделий, оговоренными в ТТ и ТУ. При испытаниях изделий серийного и массового производства уровни качества устанавливаются по соглашению между изготовителем и заказчиком или могут определяться опытным путем. По результатам испытаний выборки изделий из партии (N) определяют количество отказавших (d) и подсчитывают вероятность безотказной работы (P). При этом предполагают, что число отказавших изделий мало по сравнению с объемом партии N ($n < 0,1N$). По величине P партия изделий может быть отнесена к одной из категорий качества:

- 1) $P \leq P_1$ - хорошее изделие;
- 2) $P_1 < P < P_2$ - допустимое изделие;
- 3) $P > P_2$ - брак.

При планировании испытаний на надежность следует

исходить из того, что ряд параметров должен быть задан в ТТ или ТУ.

Испытания могут планироваться по одному уровню надежности P_2 при риске заказчика β или по двум уровням надежности P_1 и P_2 при рисках изготовителя α и заказчика β . Продолжительность испытаний более точно может быть определена в случае, когда известен закон распределения отказов. Если закон распределения отказов по времени неизвестен, то продолжительность испытаний t_n рекомендуется выбирать равной времени (t_r), на которое в ТТ и ТУ задаются требования по надежности изделий (P_1) и (P_2). При известном законе распределения отказов во времени испытания можно планировать как при $t_n = t_r$, так и при $t_n \neq t_r$.

Метод однократной выборки характеризуется большим размером выборки и его целесообразно применять для испытаний опытных образцов, когда объем испытаний задается заранее и он сравнительно невелик.

Метод двукратной выборки характеризуется тем, что делаются две выборки объемом n_1 и n_2 при заданных оценочных нормативах c' и c . Этот метод применяется при $P_2 > 0,9$. По характеристикам первой выборки принимается одно из трех решений: принять партию, забраковать партию или произвести еще одну выборку определенного объема. Пользуясь результатом первой и второй выборок, принимается одно из двух решений – принять партию при $x_n \leq c_1$ или забраковать партию при $x_n > c_2$. Повторная выборка производится только в случае, когда $c'_1 < x_{n1} < c_2$.

Определив объем повторной выборки n_2 и выборочный параметр x_{n2} , составляют функцию $f(x_{n1}, x_{n2})$, значение которой сравнивается с оценочным параметром. Партия изделий принимается при выполнении условия $f(x_{n1}, x_{n2}) < c_3$. Риск изготовителя и заказчика при двукратной выборке определяется следующим уравнением:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= P[x_{n_1} > c_2 \quad \text{или} \quad f(x_{n_1}, x_{n_2}) > c_3 \quad \text{при} \quad x_0 = X_1] \\ \beta &= P[x_{n_1} > c_1 \quad \text{или} \quad f(x_{n_1}, x_{n_2}) \leq c_3 \quad \text{при} \quad x_0 = X_2] \end{aligned} \right\}, (1.29)$$

Примем, что уровни качества x_1 и x_2 определяются уровнями надежности P_1, P_2 , а оценочные нормативы c_1, c_2 и c_3 устанавливаются приводимыми ниже соотношениями:

условие приемки по I выборке объема n_1 :

$$\frac{m_1}{n_1} \leq c_1,$$

где m_1 – число дефектных изделий в I выборке;

условие браковки по I выборке:

$$\frac{m_1}{n_1} > c_2,$$

условие приемки после II выборки объема:

$$\frac{m_1 + m_2}{n_1 + n_2} \leq c_3,$$

где m_2 - число дефектных изделий во II выборке.

Тогда уравнения (23) можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= P\left(\frac{m_1}{n_1} > c_2 \quad \text{или} \quad \frac{m_1 + m_2}{n_1 + n_2} > c_3 \quad \text{при} \quad x_0 = P_1\right); \\ \beta &= P\left(\frac{m_1}{n_1} \leq c_2 \quad \text{или} \quad \frac{m_1 + m_2}{n_1 + n_2} \leq c_3 \quad \text{при} \quad x_0 = P_2\right). \end{aligned} \right\}, (1.30)$$

Преобразовав эти уравнения для принятого закона распределения отказов во времени и произведя необходимые вычисления, можно выполнить расчеты, необходимые для

планирования испытаний. Определение размера выборки и оценки результатов испытаний по одному уровню надежности методом двукратной выборки производится исходя из следующих данных: β , P_2 и t_r . Также задаются оценочные параметры c_1 , c_2 и c_3 , но они записываются в удобной для расчетов форме. Для I выборки: браковочное число $C'_1=c'_{2n_1}$, приемочное число $C_1=c_{1n_1}$.

Для II выборки: браковочное число $C'_2=c'_{2n_2}$, приемочное число $C_2=c_{1n_2}$, где $c'_2 > m_2/n_2$, а $c_2 \leq m_2/n_2$.

Метод двукратной выборки целесообразно применять для испытаний серийных изделий, так как он позволяет получить экономию по числу контролируемых изделий. Следует иметь в виду, что выбор количества изделий, необходимых для проведения испытаний, зависит от предполагаемого метода оценки результатов испытаний.

1.13. Основные сведения о климатических механических факторах, воздействующих на приборы и системы

Для разработки технических условий, а так же для составления программы и методики испытаний необходимо знание климатических условий эксплуатации и механических воздействий, которым подвергаются приборы и системы.

Климатические условия (климат) определяются режимами погоды, в разных частях земной поверхности за продолжительный период времени. Основными показателями, характеризующими режим погоды, являются: температура, атмосферное давление, влажность, господствующие ветры и осадки.

Формирование климата на определенной территории обуславливают следующие климатообразующие факторы: радиационный режим, циркуляция атмосферы, влагооборот и местные физико-географические особенности (характер подстилающей поверхности, под которым понимается верхний слой почвы, растительный покров, верхний слой воды, снежный покров, ледяной покров и т. п.).

Перечисленные факторы определяют тепловой и водный баланс поверхности Земли в природной географической среде.

Радиационный режим характеризуется распределением радиационного баланса, учитывающего приход-расход энергии солнечной радиации. Составными частями радиационного баланса являются прямая (Q) и рассеянная (q) солнечная радиация, а также эффективное излучение Земли (E), под которым понимают разность между двумя потоками: одного - направленного от земной поверхности к атмосфере, другого - противоизлучения от атмосферы к земной поверхности. Для характеристики отношения отраженной энергии к падающей пользуются числом, носящим название альбеда (a). Часто альбеда выражают в процентах. Очевидно, что отражение энергии зависит от местных физико-географических условий земной поверхности, включая близость моря, высоту места, направление горных хребтов, морских течений и т. д. Радиационный баланс выражается следующим уравнением:

$$R=(Q + q)(1-a)-E, \quad (1.31)$$

Величину солнечной радиации оценивают числом калорий тепла, приносимого солнечными лучами в единицу времени на 1 см^2 поверхности. Количество калорий тепла, приносимых солнечными лучами за 1 минуту на 1 см^2 поверхности, при условии, что исключается ослабляющее действие воздуха, принято называть солнечной постоянной. Оно примерно составляет $2 \text{ кал/см}^2 \text{ мин}$.

На основании многочисленных исследований радиационных условий отдельных пунктов Земли разработаны мировые карты составляющих радиационного баланса и установлено, что среднемесячные суточные значения суммарной солнечной радиации при безоблачном небе ($Q-0$) являются сравнительно устойчивыми величинами и в основном определяются широтой места и временем года (рис. 1.12).

Суточный ход и часовые суммы солнечной радиации зависят от места расположения климатической области и характерных для нее погодных условий (рис. 1.13). Оценка изменчивости солнечной радиации производится отношением ее максимальной величины к минимальной, выраженной в процентах.

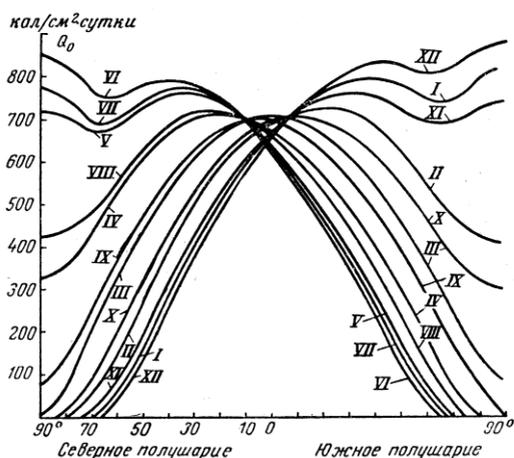


Рис. 1.12. Среднемесячные суточные значения суммарной солнечной радиации при безоблачном небе в зависимости от широты места и времени года

Наименьшая изменчивость суточных сумм суммарной и рассеянной радиации наблюдается в пустынных районах Земли, что объясняется малооблачностью погоды и преобладанием облаков верхнего яруса, мало ослабляющих солнечную радиацию. Наибольшее различие между максимальным и минимальным значениями имеет место в прибрежных районах умеренных широт, что объясняется большой изменчивостью погодных условий. Наличие паров воды и пыли в воздухе значительно уменьшает интенсивность солнечной радиации.

Циркуляционные условия характеризуют перемещение воздушных масс (течений), несущих различные количества

тепла и влаги, а также изменение их свойств, сопровождающееся образованием поверхностей раздела между разными воздушными массами.

Циркуляционные процессы существенно влияют на формирование климата. Основными причинами общей циркуляции атмосферы является неодинаковое нагревание Солнцем поверхности земного шара, а также вращение Земли, которое приводит к отклонению воздушных течений (в северном полушарии в северо-восточном направлении). Одним из важнейших факторов, определяющих такие элементы климата, как осадки, испарение, облачность, туманы, влажность, а также его континентальность является влагооборот.

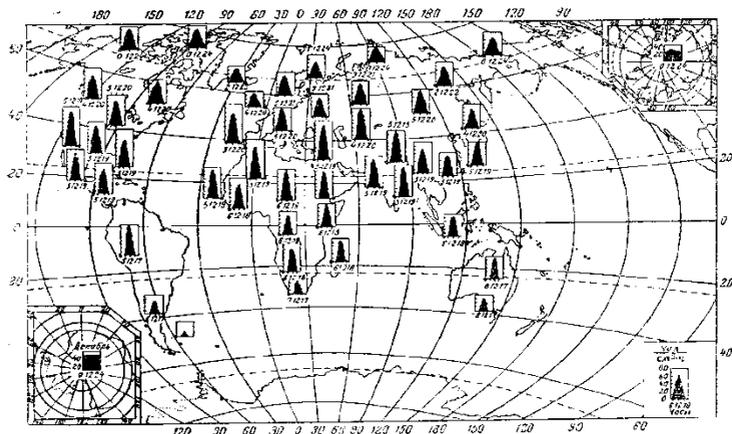


Рис. 1.13. Карта – диаграмма суточного хода суммарной радиации

Под влагооборотом понимают ряд последовательных физических процессов, происходящих с водой: испарение, конденсация (образование облаков), выпадение осадков, а также перенос влаги. Влагооборот зависит от неравномерности нагревания суши и океана, наличия циркуляции воздушных масс и изменения свойств

подстилающей поверхности. Влагооборот между сушей и океаном называют внешним, а процесс испарения и конденсации в пределах ограниченной территории - внутренним. Внутренний влагооборот (рис. 1.14) определяет внешняя влага (r), которая частично выпадает (r_1) на территорию в виде осадка, а частично выносится за ее пределы атмосферным стоком (c). Часть выпавших осадков испаряется (E), а часть образует поверхностный сток (F).

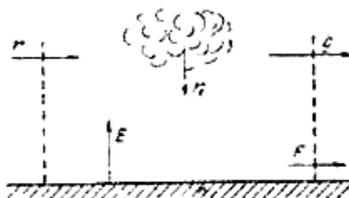


Рис. 1.14. Внутренний влагооборот на ограниченной территории

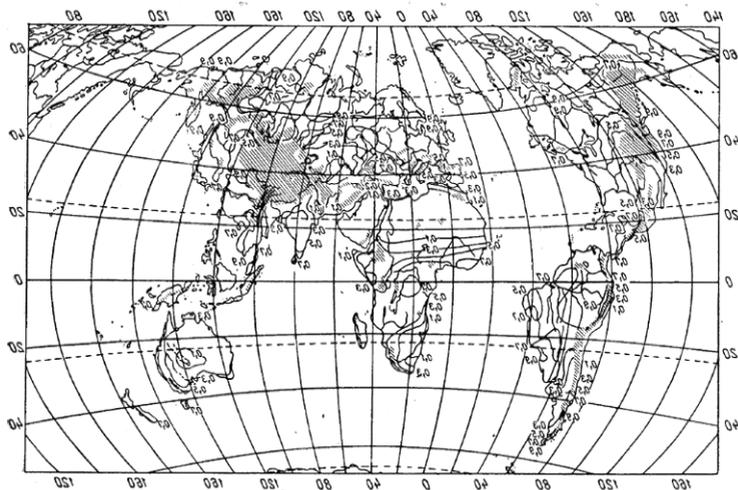


Рис. 1.15. Распределение отношения годовых сумм испарения к испаряемости

При массовых гидрометеорологических наблюдениях измерениями учитывается количество выпавших осадков (r_1) и величина испарившейся влаги (E).

Одним из основных компонентов влагооборота является испарение, которое зависит от радиационного баланса (энергетических ресурсов) и условий увлажнений поверхности Земли. Увеличение широты места и уменьшения солнечной радиации (энергетического ресурса) обуславливает убывание испарения. В тропических широтах с большими энергетическими ресурсами фактором, определяющим испарение, являются условия увлажнения. Для характеристики возможного испарения с поверхности достаточно увлажненной суши пользуются понятием испаряемости. Представляет интерес оценка отношения годовых сумм фактического испарения E к испаряемости E_0 для средних многолетних условий. Указанное отношение можно использовать в качестве показателя распределения влажности разных территорий (рис. 1.15).

Последним климатообразующим фактором являются местные физико-географические условия определенной территории. Физико-географические условия характеризуются географической широтой, высотой над уровнем моря, различием форм рельефа (горные хребты, плоскогорья, возвышенности, низменности и т. п.), а также особенностями подстилающей поверхности. Под действием рассмотренных климатообразующих факторов формируются различные типы климатов отдельных зон Земли.

Известный климатолог Б.П. Алисов предложил построить классификацию климатов на основе изучения процессов радиации и атмосферной циркуляции в различных широтах. Кроме того, выделяют горный климат, характеризующийся повышением разреженности воздуха и понижением температуры по мере увеличения высоты.

Важнейшими показателями термического режима являются абсолютные годовые минимумы и максимумы температуры. Основными факторами, определяющими

изменение температуры, являются широта места, степень континентальности и топографические условия.

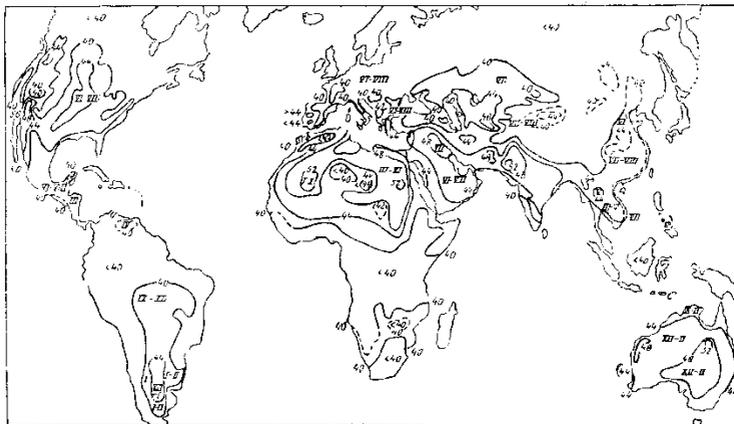


Рис. 1.16. Карта абсолютного максимума температуры воздуха

Влияние первых двух факторов приводит к плавному и последовательному изменению температуры. Распределение абсолютных годовых максимумов и минимумов в основном носит широтный характер, отражая влияние притока тепла от Солнца и особенности атмосферной циркуляции. Большое влияние оказывает также степень континентальности, влияние морей и океанов и характер подстилающей поверхности (ландшафт). Действие топографических условий (высота над уровнем моря и форма рельефа) нарушает плавный ход, и изменение температуры получает сложный характер.

Карта абсолютного максимума температуры воздуха (рисунок 16) показывает, что температура более 40°C наблюдается до 50°C умеренных широт. На рис. 1.17 представлена карта средних из абсолютных годовых минимумов температур воздуха на земном шаре.



Рис. 1.17. Представлена карта средних из абсолютных годовых минимумов температур воздуха на земном шаре

Рассмотрение климатических условий приводит к выводу, что для различных типов климатов характерны различные сочетания и длительности воздействующих факторов.

При эксплуатации приборов в некоторых специфических условиях иногда, кроме учета воздействия климатических факторов, следует также рассматривать воздействие биологических факторов (плесени, различных микроорганизмов, насекомых и грызунов).

Освоение космического пространства приводит к необходимости изучения воздействия космических условий на приборы и системы.

Помимо климатических воздействий, большинство видов приборов в процессе своей эксплуатации и при транспортировке подвергаются различным механическим воздействиям. Результатом такого воздействия является возникновение вредного колебательного процесса,

получившего название вибрация. Вибрацией принято также называть колебательное движение, воспроизводимое с испытательной целью специальными установками - вибрационными стендами и вибраторами.

Различают периодическую, гармоническую, импульсную и случайную вибрации. Частным случаем импульсной вибрации является одиночный механический импульс, называемый ударом. При этом полагают, что длительность импульса ($t_{и}$) много меньше времени до его повторения (T), а результирующий эффект (возникающие силы, ускорения, скорости, смещения) - значителен.

Механические колебательные процессы характеризуются рядом параметров. Если условно колебательное движение изделия заменить колебательным движением точки, то мгновенное значение каждой из ее координат называют перемещением или вибрационным смещением и обозначают $S(t)$.

Первая производная перемещения или вибрационного смещения называется соответственно колебательной или вибрационной скоростью:

$$V = \frac{dS(t)}{dt}, \quad (1.32)$$

а вторая производная - колебательным или вибрационным ускорением:

$$a = \frac{d^2 S(t)}{dt^2}, \quad (1.33)$$

В зависимости от направления перемещения рассматриваемой точки тела вибрация может быть прямолинейной, плоскостной и объемной. При прямолинейной вибрации точка тела остается на одной прямой. Поскольку эта прямая может быть расположена под любым углом γ_0 к горизонту, то возможны два крайних случая прямолинейной вибрации: горизонтальная и вертикальная.

При плоскостной вибрации рассматриваемая точка - тела перемещается в одной плоскости. Плоскостная вибрация также может быть горизонтальной и вертикальной. Кроме того, в зависимости от вида фигуры, описываемой точкой тела, она может быть круговой, эллиптической и т. д. Если рассматриваемая точка тела перемещается в некотором объеме пространства, то имеет место объемная вибрация.

Периодической вибрацией называется колебательный процесс, при котором все характеризующие его параметры повторяются через одинаковые промежутки времени T в неизменной последовательности.

Во многих практических случаях несколько колебательных процессов могут протекать одновременно. При этом суммарный эффект определяется алгебраической суммой мгновенных значений колебательных величин, что приводит к маскировке основного процесса. Если мгновенные значения колебательной величины пропорциональны синусу или косинусу линейной функции времени:

$$q = q_a \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.34)$$

$$q = q_a \cos(\omega t + \varphi). \quad (1.35)$$

Такой периодический колебательный процесс называется гармоническим или синусоидальным.

Наибольшее абсолютное значение, достигаемое гармонической колебательной величиной, называется амплитудой и обозначается q_a , а аргумент $(\omega t + \varphi)$ в выражениях для q называется фазовым углом.

Два колебания с одинаковой частотой называются синхронными. Наличие у таких колебаний различных начальных фазовых углов φ_1 и φ_2 приводит к тому, что они оказываются сдвинутыми по фазе на угол $\varepsilon = \varphi_1 - \varphi_2$.

Воспользовавшись выражениями (1.28) и (1.29), можно написать выражение для механического смещения S :

$$S = S_a \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.36)$$

$$S = S_a \cos(\omega t + \varphi),$$

где S_a - амплитуда смещения; для скорости.

$$\begin{aligned} V &= \omega S_a \cos(\omega t + \varphi) = V_a \cos(\omega t + \varphi), \\ V &= -\omega S_a \sin(\omega t + \varphi) = -V_a \sin(\omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (1.37)$$

для ускорения

$$\begin{aligned} a &= -\omega^2 S_a \sin(\omega t + \varphi) = -a_a \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 S, \\ a &= -\omega^2 S_a \cos(\omega t + \varphi) = -a_a \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 S. \end{aligned} \quad (1.38)$$

Колебательное ускорение и смещение находятся в противофазе. Амплитуды смещения S_a , скорости V_a и ускорения a_a связаны соотношением:

$$a_a = \omega V_a = \omega^2 S_a, \quad (1.39)$$

или для числа колебаний в секунду

$$a_a = (2\pi\nu)^2 S_a, \quad (1.40)$$

где S_a - амплитуда смещения, мм;

ν - частота колебаний, Гц.

При большом числе измерений и вычислений удобно пользоваться номограммой, приведенной на рисунке 18, построенной на основании следующей формулы:

$$a_a = \frac{4\pi^2 \nu^2 S_a}{9807}, \quad (1.41)$$

где a_a - амплитуда ускорения выражена в g_a .

На практике удобно пользоваться упрощенной формулой:

$$a_a \approx \frac{2S_a}{500} \nu^2 = 0,004 S_a \nu^2, \quad (1.42)$$

где $2S_a$ - размах колебания.

Значения подсчитанные по формуле (1.36), получаются

на 0,6% меньше, чем по формуле (1.35). Для сравнительной оценки интенсивности вибрации, выражаемой в величинах мощности P , пользуются логарифмическими единицами - децибелами:

$$M = 10 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (1.43)$$

где P - интенсивность мощности вибрации относительно некоторой начальной мощности P_0 .

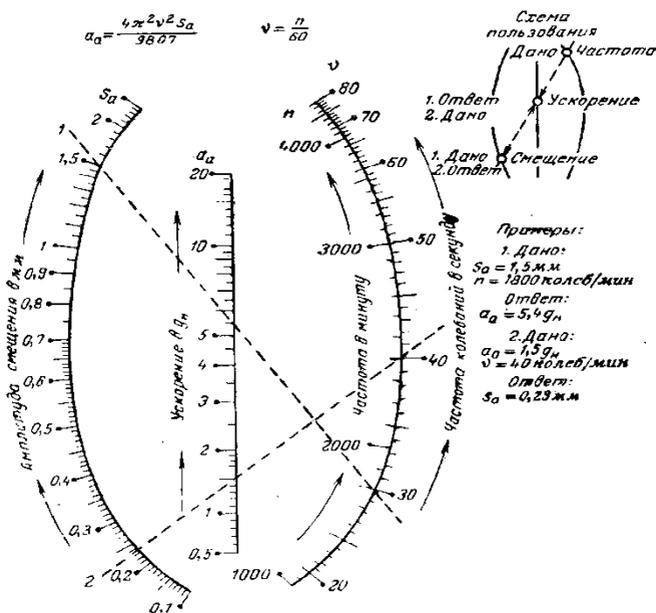


Рис. 1.18. Номограмма для пересчета амплитуд смещения в амплитуду ускорения и обратно

Колебательный процесс, при котором в течение конечных промежутков времени (пауз) колебательная величина $q = 0$, а в течение промежутков времени t_n отлична от нуля, называется импульсным. Импульсные процессы бывают периодическими и непериодическими. Одиночные механические импульсы являются ударами.

На практике часто имеют место колебательные процессы (вибрация), при которых значения колебательной величины q_1, q_2, \dots в различные моменты времени t_1, t_2, \dots являются случайными. Такие случайные вибрационные колебания можно представить себе как любые непериодические и неповторяющиеся колебания. Случайную вибрацию можно описать как колебание, состоящее из последовательного ряда синусоидальных колебаний всех частот, в которых амплитуды и фазовые углы изменяются случайным образом во времени.

Известно, что свойства колебательного процесса характеризуются его спектром. Различают амплитудный и фазовый спектры колебаний. Амплитудным спектром принято называть совокупность амплитуд гармонических составляющих колебания, а фазовым спектром - совокупность их начальных фазовых углов.

Если гармонические составляющие колебания обладают дискретными значениями частот, то они образуют линейчатый спектр. Такой спектр имеют периодические колебания, у которых частоты членов тригонометрического ряда Фурье изменяются от предыдущего члена к последующему степенями, равными основной частоте колебания ω :

$$q(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \frac{2\pi}{T}t + a_2 \cos 2\frac{2\pi}{T}t + \dots + a_k \cos k\frac{2\pi}{T}t + \dots + b_1 \sin \frac{2\pi}{T}t + \dots + b_2 \sin 2\frac{2\pi}{T}t + \dots \quad (1.44)$$

где $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$ и b_1, b_2, \dots, b_k коэффициенты Фурье.

Основную частоту периодических колебаний принято называть базисной. При гармонических колебаниях частоты более высокие, чем базисные, и кратные ей называют высшими составляющими или составляющие высшего порядка (обертонами).

Величина i указывает кратность частоты данной гармонической составляющей относительно основной частоты. Составляющая i -го порядка равна произведению i_v .

Для характеристики степени содержания в

периодическом колебании обертонов (высших гармоник) пользуются коэффициентом гармоник (нелинейных искажений), представляющим собой отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд гармоник выше первой к первой гармонике:

$$\gamma = \frac{\sqrt{S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_k^2}}{S_1}, \quad (1.45)$$

Если гармонические составляющие колебания обладают непрерывной последовательностью частот, то они образуют сплошной спектр, характерный для непериодических колебаний. Данный спектр содержит бесконечно большое число гармонических колебаний с бесконечно-малыми амплитудами.

Известно, что имеется связь между сплошным и линейчатым спектрами с одной стороны и спектрами одиночного и повторяющегося импульсов с другой (рисунок 19). Если функция $q_n(t)$ описывает некоторый одиночный импульс длительности t_n , а функция $q(t)$ описывает периодический процесс, возникающий при повторении этого же импульса через промежутки времени T , то можно показать, что линейчатый спектр периодической функции $q(t)$ вписывается в сплошной спектр $S_n(\omega)$ функции $q_n(t)$ для одиночного импульса, причем чем меньше частота повторения импульсов $\Omega=2\pi/T$, тем гуще расположены дискретные линии спектра ($\nu = \omega = i \Omega$). В пределе, когда имеет место одиночный импульс, эти линии заполняют всю ось ω и линейчатый спектр с амплитудами $S_0, S_1, S_2, \dots, S_i$, переходит в сплошной.

Если имеют место беспорядочно следующие один за другим короткие импульсы, то соответствующий им энергетический спектр оказывается постоянным в диапазоне частот. Колебательный процесс, имеющий указанный выше спектр, называют белым шумом (белой вибрацией). На практике белый шум может иметь место при случайной

вибрации, но он встречается крайне редко.

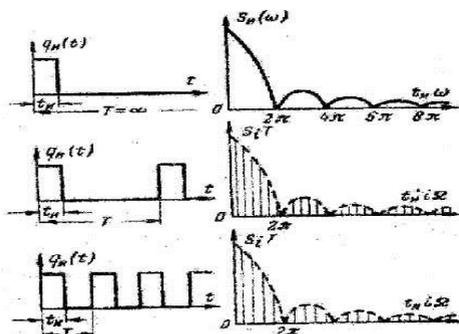


Рис. 1.19. Связь между амплитудными спектрами единичного и периодически повторяющегося импульсов

Для наглядности спектр колебаний изображают графически спектральной диаграммой. Чаще строят или получают с помощью измерительной аппаратуры амплитудную спектральную диаграмму, у которой по оси абсцисс откладываются частоты ν (или ω) гармонических составляющих, входящих в состав колебательного процесса, а по оси ординат из точек соответствующих частот откладывают отрезки, пропорциональные значениям амплитуд.

Колебательное движение является одним из наиболее сложных процессов, так как колеблющаяся точка (тело, изделие) может иметь много степеней свободы и широкий частотный спектр колебаний. Для оценок различных колебательных процессов необходимо в общем случае получить сведения о шести независимых, координатах ($S_x, S_y, S_z, a_x, a_y, a_z$), определяющих положение изделия в пространстве, во времени за достаточно длительный период. Такие сведения желательно иметь в виде осциллографических, магнитных и других видов записей, называемых виброграммами. Виброграммы чаще снимают для линейных смещений $S_x(t), S_y(t), S_z(t)$, но они могут быть сняты

и для угловых координат $a_x(t)$, $a_y(t)$, $a_z(t)$. Пользуясь указанными данными, можно в принципе получить и другие параметры колебательных процессов.

1.14. Общие положения об испытаниях приборов и систем

Краткое рассмотрение климатических и механических факторов, воздействующих на приборы и его элементы, позволяет определить, каким видам испытаний они должны подвергаться.

Почти все приборы и системы испытывается на механические воздействия. В зависимости от целей испытаний на воздействие вибрационных и ударных нагрузок различают проверку на прочность и на устойчивость. При этом принято считать, что целью проверки на прочность является установление способности изделий противостоять разрушающему влиянию механических воздействий и продолжать после их прекращения нормально выполнять свои функции. Целью проверки на устойчивость является установление способности изделий выполнять свои функции и сохранять электрические параметры в пределах, указанных в ТЗ и ТУ норм при механических воздействиях.

Как показывает анализ, методы проведения указанных испытаний существенно не различаются. Отличие испытаний на прочность от испытаний на устойчивость заключается в продолжительности и в том, что им главным образом подвергаются изделия, не предназначенные для работы в условиях механических воздействий и испытывающие их только при транспортировании. Такой подход оправдывает то, что испытаниям на прочность подвергают не работающие приборы, а измерение параметров производится до и после механических воздействий. В данном случае проведение испытаний под электрической нагрузкой можно рассматривать, как создание более жестких условий. Испытания на устойчивость проводят: во-первых, для

проверки способности изделий выполнять свои функции и сохранять электрические параметры в пределах норм, во-вторых, для выявления нарушений в технологическом процессе производства; в-третьих, при необходимости определения величины, повреждающей нагрузки.

Таким образом, различают следующие виды механических испытаний: виброустойчивость, вибропрочность при длительном или кратковременном воздействии, ударная устойчивость и прочность, устойчивость к воздействию одиночных ударов с большим ускорением, устойчивость к воздействию центробежного ускорения, воздействие звукового давления, воздействие ускорений при транспортировании, взрывное воздействие, ветроустойчивость, устойчивость к воздействию качки и длительным наклонам, износоустойчивость элементов.

Помимо механических испытаний, приборы и его элементы подвергают климатическим испытаниям, одним из важных видов которых являются испытания на тепло- и влагоустойчивость. Перед проведением этих испытаний необходимо установить их продолжительность. Различают испытания на длительное и кратковременное воздействия. Выбор длительности зависит от назначения и условий эксплуатации ЭА и оговаривается в ТУ.

Различают следующие виды климатических испытаний: теплоустойчивость при длительном или кратковременном воздействии, влагоустойчивость при длительном или кратковременном воздействии, циклическое воздействие температуры, холодоустойчивость, воздействие инея и росы, воздействие повышенного или пониженного атмосферного давления, воздействие солнечной радиации, воздействие морского тумана, воздействие пыли (пылеустойчивость или пылезащищенность), грибоустойчивость, воздействие дождя, воздействие гидростатического давления.

Непрерывно расширяющиеся работы по созданию новых космических кораблей приводят к тому, что вместо испытаний на воздействие климатических условий

околоземной атмосферы необходимо разрабатывать новые методы исследований на воздействие космических условий. Соответственно меняются и уровни механических воздействий. Таким образом, при испытаниях ЭА и ее элементов, устанавливаемых на космических кораблях, их необходимо испытывать на виды воздействий, приведенные в табл. 1.5.

Основным документом, определяющим последовательность работ при испытаниях, является методика испытаний.

Различают три основных способа проведения лабораторных испытаний: последовательный, параллельный и комбинированный.

Последовательный способ предполагает поочередное раздельное воздействие различных внешних факторов на испытываемые приборы и наблюдение за их состоянием. Важным условием проведения последовательных испытаний является соблюдение определенного порядка воздействия внешних факторов. Рекомендуется начинать испытания с воздействий на приборы наименее жестких внешних факторов, при которых будет наименьшая опасность отказов. Возникающие при этом внезапные отказы не приводят обычно к большим задержкам во времени для их устранения, а также к росту расходов на испытания. Воздействие определенного внешнего фактора на работу приборов и систем при данном методе испытаний позволяет более точно определить причины наблюдаемых отказов.

Важную роль играет последовательность проведения испытаний. Установление единой последовательности проведения испытаний для различных приборов и их элементов вряд ли оправдано. Оптимальная последовательность проведения испытаний зависит от назначения прибора, места его установки и предполагаемых условий эксплуатации. Поэтому последовательность проведения испытаний для конкретных изделий указывается в ТУ или программе испытаний. Рекомендуется климатические

испытания прибора и его элементов проводить после радиотехнических, электрических и механических испытаний.

Недостатком способа является зависимость результатов испытаний от воздействия только одного внешнего фактора, что затрудняет возможность разработки выводов по поведению прибора и системы в реальных условиях эксплуатации. Кроме того, данный способ испытаний весьма продолжителен и при его осуществлении имеет место большой износ прибора.

Параллельный способ испытаний характеризуется тем, что воздействию различных факторов подвергаются одновременно (параллельно) несколько одинаковых ЭА. Данный способ позволяет получить максимальное количество данных о состоянии прибора за кратчайший промежуток времени при минимальном износе испытываемых образцов.

Комбинированный способ испытаний характеризуется одновременным воздействием ряда различных факторов на испытываемые приборы. Он позволяет определить реакцию прибора и системы на одновременное воздействие нескольких внешних факторов, что максимально приближает испытания к реальным условиям эксплуатации. Кроме того, реализация данного способа позволяет экономить время испытаний. Комбинированный способ испытаний выявляет такие отказы, которые при последовательном способе могли бы и не возникнуть. Однако в данном случае определить причину отказа бывает затруднительно, что приводит к необходимости исследования возникшего отказа путем проведения последовательных испытаний.

Выбор сочетаний совместных воздействий различных факторов на испытываемые приборы и системы может производиться в соответствии с табл. 1.5.

Совместные воздействия различных факторов при испытании изделия.

Таблица 1.5

Повышенная температура																	
Пониженная температура	7																
Влажность	1	1															
Дождь	X	1-	4														
Туман (морской)	6	X	4	2													
Солнечная радиация	1	6	1-	7	6												
Грибообразование	4	6	4	4	4	6											
Пыль и песок	6	1-	1-	X	1-	1-	X										
Низкое атмосферное	1	3-	1	X	X	1-	X	X									
Ветер	1-	3	X	3	6	1	X	3	6								
Загрязнение	X	X	1	5	1	X	X	1-	X	5							
Вибрация	1	1	1-	X	X	1	X	1-	1-	X	X	1-					
Звуковое давление	1	1-	X	X	X	X	X	X	1-	X	X	X	1				
Удар	1	1	X	X	X	X	X	X	1-	X	X	X	X				
Космическая радиация	X	X	X	X	X	5	X	X	3-	X	X	X	X	X	X	1-	
Комбинированное воздействие внешних факторов	Повышенная температура	Пониженная температура	Влажность	Дождь	Туман	Солнечная радиация	Грибообразование	Пыль и песок	Низкое атмосферное	Ветер	Загрязнение воздуха	Соляные брызги	Вибрация	Удар	Ионизированные газы		

Примечания: 1 - сопровождается механическим износом; 2 - сопровождается ухудшением работоспособности; 3 - механический износ и ухудшение работоспособности; 4 - взаимосвязанные факторы; 5 - один фактор влияет на другой; 6 - взаимно ослабляющие факторы; 7 - несовместимые факторы. X - сочетание факторов не рассматривается. Знак минус после числа 1, 2, 3 означает, что совместное действие факторов уменьшает их влияние.

Следует иметь в виду, что не всегда испытания комбинированным способом приводят к ужесточению условий. Например, низкие температуры препятствуют, росту плесени и коррозии в морских условиях. Часто комбинированные испытания осуществляют из-за невозможности разделения одновременного воздействия нескольких внешних факторов, а также оценки эффекта от их влияния на РЭА: например одновременное воздействие повышенной влаги и температуры. Недостатком комбинированного способа является необходимость создания и использования дорогого и сложного оборудования для испытаний и контроля.

В ряде случаев рекомендуется для ускорения проведения испытаний осуществлять их параллельно-последовательным способом. При этом отобранное количество испытываемых приборов разбивается на несколько групп, которые испытываются параллельно. В каждой из групп испытания проводят последовательным способом. В данном случае все виды испытаний целесообразно разбить на четыре группы с таким расчетом, чтобы, с одной стороны, продолжительность испытаний во всех группах была примерно одинаковой, а с другой - чтобы объединенные в одну группу виды испытаний были близки к реальным условиям.

Так, например, испытания на грибоустойчивость, на длительное воздействие тепла и морского тумана, на воздействие солнечной радиации рекомендуется проводить на РЭА, не подвергающихся другим видам механических и климатических воздействий. Возможная разбивка видов

испытаний по группы и последовательность их проведения приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Группа	Виды испытаний
I	Виброустойчивость Вибропрочность при длительном воздействии Ударная прочность Ударная устойчивость Устойчивость к воздействию центробежного ускорения Воздействие одиночных ударов с большим ускорением Циклическое воздействие температуры Высотность Воздействие солнечной радиации Воздействие пыли (пылеустойчивость и пылезащищенность)
II	Теплоустойчивость при длительном воздействии Воздействие морского тумана
III	Влагоустойчивость при длительном воздействии Холодоустойчивость Воздействие инея и росы
IV	Грибоустойчивость

Если прибор и его элементы предназначены для эксплуатации в условиях тропического климата, рекомендуется испытывать их в следующей

последовательности: 1) теплоустойчивость; 2) влагоустойчивость; 3) холодоустойчивость; 4) пониженное атмосферное давление; 5) солнечная радиация; 6) пылеустойчивость; 7) грибоустойчивость; 8) морской туман.

Разработка методики испытаний на воздействие внешних факторов состоит из следующих основных этапов.

На первом этапе на основании технических условий (ТУ) и программы испытаний (ПИ), а также теории и данных экспериментов, полученных в процессе разработки конкретной РЭА с учетом действующих требований, норм и методов механических и климатических испытаний необходимо определить:

1) каким способом будут осуществляться испытания (последовательным, параллельным или комбинированным) и в какой степени выбранный способ испытаний позволит быстро и однозначно определить характер отказов;

2) с помощью, каких технических средств будут воспроизводиться внешние воздействия;

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

4) какими способами будут осуществляться закрепление и монтаж испытываемого прибора на специальных стендах и в камерах.

Важным вопросом является установление интенсивности (жесткости) воздействий, которая зависит от выбора метода испытаний (моделирование реальных условий, ускоренный или граничный методы).

Если установлены корреляционные связи между реальными и ускоренными испытаниями, то целесообразно проводить последние. При ускоренных испытаниях РЭА подвергается интенсивному воздействию в течение короткого промежутка времени. Разрабатывая методику ускоренных или граничных испытаний, необходимо обратить внимание на возможность их повторения с минимальными отклонениями

параметров.

При разработке методики граничных испытаний и испытаний на повреждающую нагрузку необходимо предусмотреть возможность определения коэффициента запаса между способностью изделия работать при перегрузках и работой в реальных условиях эксплуатации.

При установлении интенсивности воздействий различных факторов на приборы и системы следует решить, рассматривать ли только экстремальные значения параметров, характеризующих внешние воздействия, или же весь спектр возможных значений. Как показывает практика, воздействие экстремальных значений не эквивалентно воздействию спектра. Так, например, при рассмотрении воздействия тепла представляет интерес оценить эффект, создаваемый быстрыми изменениями температуры (тепловой удар).

При рассмотрении воздействия вибрации необходимо оценить эффект, создаваемый вибрацией на одной частоте или спектром частот.

Для установления единства требований, предъявляемых к климатическим и механическим испытаниям элементов радиоэлектронной аппаратуры, Международной электротехнической комиссией (МЭК) разработаны рекомендации по методикам проведения испытаний.

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

На втором этапе, пользуясь проектом методики, производят предварительные испытания, в ходе которых проверяется соответствие всего технического и контрольно-измерительного оборудования предъявляемым к нему требованиям. На основании полученных в процессе предварительных испытаний данных уточняется методика испытаний, а также режимы всего испытательного оборудования.

На третьем этапе производят полные испытания РЭА в соответствии с разработанной методикой.

На четвертом этапе обрабатывают и анализируют полученные данные, а также вносят необходимые коррективы в методику испытаний.

Место печати ОТК

Основными пунктами методики испытаний на любой вид воздействия являются:

I. Цель испытаний.

II. Применяемое испытательное и контрольно-измерительное оборудование.

III. Процесс проведения испытаний.

IV. Заключение о состоянии испытываемого изделия.

В процесс проведения испытаний входят следующие основные операции:

Первая операция - предварительная выдержка, обеспечивает достижение изделием (ЭА или его элементами) определенного состояния за счет хранения в определенных климатических условиях при заданных механических воздействиях. Обычно РЭА выдерживают без упаковки в нормальных климатических условиях в течение времени, предусмотренном в ТУ или ПИ.

Нормальные климатические условия характеризуются температурой $20^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$; относительной влажностью $65\pm 15\%$; атмосферным давлением 720 - 780 мм рт. ст.

Вторая операция - предварительные измерения, устанавливают работоспособность изделия.

Третья операция - установка изделия в камеру.

Четвертая операция - первоначальные измерения параметров, определяют состояние изделия до испытаний.

Пятая операция - выдержка изделия при воздействии на него определенных климатических или механических факторов, или тех и других совместно, для определения их влияния.

Продолжительность испытаний изделий отсчитывается с момента времени достижения установившегося режима.

Шестая операция - измерение параметров, определение

состояния изделия в процессе испытаний (иногда не производится).

Седьмая операция - заключительные измерения (восстановление), проводят по окончании испытаний (в камере или после изъятия из нее) с целью установления, какое влияние на изделие оказали проведенные испытания. Оценка влияния производится путем сравнения результатов заключительных измерений с результатами первоначальных. В ТУ, ПИ или в каком-либо другом руководящем материале должны быть сформулированы указания о мероприятиях в случае возникновения отказа.

Оборудование для климатических и механических испытаний должно обеспечивать проведение испытаний в соответствии с требованиями ТУ, ПИ или методики. В нем должна быть предусмотрена возможность установления заданных режимов, их регулирование и поддержание. Желательно, чтобы оборудование позволяло вести автоматическую запись и программное управление режимами испытаний. Для контроля времени наработки необходимо снабжать оборудование специальными счетчиками. Оборудование должно иметь электровводы, обеспечивающие подачу питающих напряжений и испытательных сигналов на проверяемые изделия, а также измерение электрических параметров. При необходимости должна быть предусмотрена возможность дистанционного измерения, как электрических параметров, так и показателей режимов оборудования.

Уровни электрических и магнитных помех, также как и уровень шумов, создаваемые оборудованием, должны быть минимальными и не превышать санитарно-технических норм.

В оборудовании должна быть предусмотрена световая или звуковая сигнализация его исправности и предельная аварийная сигнализация отключения оборудования.

Установлены следующие условные цвета сигнализации:

- а) красный цвет - запрещающий и аварийный, предупреждающий о превышении режима, перегрузке и т. д.;
- б) зеленый цвет - разрешающий, свидетельствующий о

нормальном режиме; в) белый цвет, означающий недостаточность в установленных режимах.

Высоковольтные цепи оборудования должны иметь автоблокировки. Все виды оборудования снабжают следующей эксплуатационно-технической документацией:

- а) техническим описанием;
- б) инструкцией по эксплуатации;
- в) формуляром;
- г) паспортами комплектующих измерительных приборов;
- д) монтажными и сборочными чертежами, правилами установки и т. д.

2. СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

2.1. Средства измерения температуры

В качестве датчиков температуры в испытательной технике применяют термопреобразователи сопротивления [3], термоэлектрические преобразователи, жидкостные термометры, дилатометры и пирометры. Наиболее широкое применение получили термопреобразователи сопротивления и термоэлектрические преобразователи. Их выпускают в разных исполнениях в зависимости от способа контакта с окружающей средой (погружаемые, поверхностные), условий эксплуатации (стационарные, переносные), защищенности от воздействия окружающей среды (обыкновенные, пылезащищенные, водозащищенные, взрывозащищенные), герметичности, инерционности, устойчивости к механическим воздействиям (обыкновенные, виброустойчивые). Они различаются также по количеству чувствительных элементов для измерения температуры в одной зоне (одинарные, двойные), числу зон (одно- и многозонные) и выводных проводников (два, три, четыре).

Принцип действия термопреобразователей сопротивления основан на использовании свойства

чувствительного элемента менять свое сопротивление при изменении температуры. Они могут быть проволочными и полупроводниковыми. Материалом проволочных термопреобразователей является, как правило, медь или платина (табл. 2.1). Чувствительный элемент большинства из них представляет собой спираль, намотанную без механических натяжений на каркас из изоляционного материала. Каркас со спиралью помещен в защитный кожух, представляющий собой металлическую или стеклянную гильзу, заполняемую гелием или порошком окиси алюминия. Важным параметром преобразователя является показатель тепловой инерции или постоянная времени, определяемая как время, в течение которого тело, помещенное в среду с постоянной температурой, нагревается до 63,2 % значения температуры среды.

Таблица 2.1

Основные параметры термопреобразователей сопротивления (по ГОСТ 6651-78)

Тип термо-преобразова-теля (материал проволоки)	Номинальная статическая характеристика преобразования	Диапазон измеряемых температур, °С	Номинальное сопротивление при 0 °С, Ом	Отношение $W_{100}=R_{100}/R_0$
ТСП (платина)	1П	От-50 до 1100	1	1,3910
	5П	"-100" 1100	5	
	10П	"-200" 1000	10	
	50П	"-260" 1000	50	
	100П 500П	"-260" 1000 "-260" 300	100 500	
ТСМ (медь)	10М	От-50 до 200	10	1,4280
	50М	"-50" 200	50	
	100М	"-200" 200	100	

По этому параметру термопреобразователи сопротивления выпускают с малой тепловой инерцией (не более 10 с), со средней (не более 60 с) и с большой (более 60 с), что определяется их конструкцией. По точности измерения температуры термопреобразователи сопротивления делят на пять классов (табл. 2.2). Они отличаются большим внутренним сопротивлением, малыми габаритами, высокой механической прочностью.

Таблица 2.2

Допускаемые отклонения параметров

Допускаемые отклонения	Класс термопреобразователя	ТСП	ТСМ
Номинального сопротивления при 0 °С, %	I	±0,05	-
	II	±0,1	±0,1
	III	+0,2	+0,2
	IV	+0,4	+0,5
	V	+0,5	±1
Отклонения 1,391(ТСП) W100 =1,428 (ТСМ)	I	-0,0015	-
		-0,0005	
	II	-0,0015	±0,0010
		-0,0010	
	III	+0,0015	±0,0020
		-0 0020	
	IV	+0,0015	±0,0030
		-0,0030	
	V	+0,0015	+0,0030
		-0,0050	-0,0050

Чувствительным элементом термоэлектрического преобразователя является термопара, представляющая собой два разнородных электрода, соединенных в одной точке (рабочий конец термопары). При неравенстве температур рабочего и свободных концов термопары на последних возникает сигнал (термо-ЭДС), пропорциональный разности температур рабочего и свободных концов. Термоэлектрические преобразователи работают в широком интервале температур. Низкие температуры (до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) измеряют медь-копелевыми, хромель-копелевыми, хромельалюмелевыми, железо-константовыми и медь-константовыми термопреобразователями, из которых последние получили наибольшее применение. Для измерения более низких температур термоэлектрические преобразователи применяют редко вследствие их невысокой чувствительности, а также значительных погрешностей, обусловленных паразитными ЭДС. Преобразователи типа ТВР используют в вакууме или в инертных средах, так как при высоких температурах на воздухе они окисляются.

Термоэлектрический преобразователь как элемент системы регулирования в значительной степени определяет характеристики температурного устройства испытательной машины. Тепловая инерция термопреобразователя зависит от его конструктивного исполнения, уровня температуры и диаметра термоэлектродов. Выпускают термопреобразователи малой, средней, большой и ненормированной инерционности с показателем тепловой инерции соответственно не более 5, 60, 180 и свыше 180 с для погружаемых и не более 10, 120, 300 и свыше 300 с для поверхностных термопреобразователей. Учитывая высокие метрологические требования, предъявляемые к температурному устройству испытательной машины, применяют термопреобразователи без чехлов, что существенно снижает их тепловую инерцию.

Жидкостные термометры применяют для контроля температуры. По своему назначению термометры делят на лабораторные, технические, медицинские, метеорологические

и др. В испытательной технике в основном применяют лабораторные термометры, а также некоторые модификации технических.

Ртутные стеклянные лабораторные термометры по конструкции делят на два типа: А - палочные из массивных капиллярных трубок со шкалой на внешней поверхности; Б - с вложенной шкальной пластиной, заключенной внутри оболочки термометра. Цена деления термометра определяет его группу, а пределы измерения - порядковый номер. Основные технические данные термометров приведены в табл. 2.3.

Максимальная температура применения не ртутных жидкостных стеклянных термометров 200 °С. В качестве наполнителей (термометрических жидкостей) используют толуол, спирт, керосин, петролейный эфир. Термометры изготовляют трех типов: А - палочные с наружным диаметром капиллярных трубок 3-12 мм со шкалой на внешней поверхности; Б - с вложенной шкальной пластиной; В - с наружной шкальной пластиной.

Все выпускаемые термометры рассчитаны либо на частичное погружение в измеряемую среду (неполное погружение), либо на погружение до считываемой температуры (полное погружение). На термометрах, рассчитанных на частичное погружение, имеется указание о глубине погружения и температуре градуировки.

По ГОСТ 9177-74, изменение показаний термометров с частичным погружением при отклонении температуры окружающей среды от 20 °С на величину до ± 10 °С не должно превышать двух делений шкалы.

Таблица 2.3

Основные технические данные лабораторных ртутных
термометров (по ГОСТ 215-73)

Группа	Номер термометра	Пределы измерения, °С	Цена деления, °С	Длина термометра, мм
1	1	От -30 до 70	1	250
	2	0-100		
	3	0-150		
	4	0-250		
	5	0-360	2	280
	6	0-450		320
	7	0-500		360
	8	0-600		400
2	1	От -30 до 70	0,5	320
	2	0-105		
	3	100-205		
	4	200-300		
3	1	От -30 до 25	0,5	160
	2	0-55		
	3	50-105		
	4	100-155		
	5	150-205		
	6	200-255		
	7	250-305		
	8	300-360		
4	1	От -30 до 25	0,1	530
	2	0-55		
	3	50-105		
	4	100-155		
	5	150-205		
	6	200-255		
	7	250-305		
	8	190-260	0,2	
	9	240-310		
	10	290-360		

В испытательных устройствах широко применяют ртутный электроконтактный термометр, в капилляре которого с помощью магнитной головки по винту перемещается подвижный рабочий контакт. Задание требуемой температуры осуществляется посредством установки подвижного контакта по шкале термометра на нужный уровень. По достижении заданной температуры термометр (ртуть) замыкает электрическую цепь регулятора температуры, последний производит необходимые коммутации энергетических агрегатов. Таким образом, ртутные электроконтактные термометры могут служить датчиками системы регулирования. По конструкции электроконтактные термометры делят на два типа: ТЗК - с заданным постоянным рабочим контактом: ТПК - с подвижным рабочим контактом, по исполнению - на прямые (П) и угловые (У). В испытательной технике в основном применяют термометры типа ТПК, дающие возможность стабилизировать тепловой режим на любом температурном уровне в пределах шкалы термометра. Минимальная температура контактирования термометров $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальная $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Допускаемая погрешность термометров ТПК и погрешность установки точки контактирования не превышают цены деления шкалы.

Дилатометр относится к механическим датчикам и представляет собой устройство, принцип действия которого основан на изменении размера тел при повышении или понижении температуры. На рис. 2.1 показан дилатометрический датчик машины для испытания на ползучесть и длительную прочность. Датчик состоит из двух тяг: 1 и 9, жестко соединенных с концами жароупорной трубы 10 линейные размеры которой зависят от температуры в рабочем пространстве высокотемпературного устройства. На конце тяг 1 закреплена ось 5, вокруг которой поворачивается рычаг 4. На рычаге закреплён подвижный контакт 6, а на тяге 1 - неподвижные контакты 7 и 8.

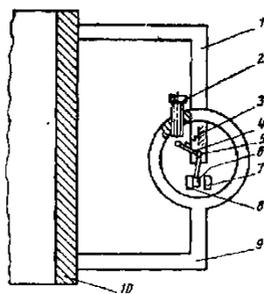


Рис. 2.1. Схема дилатометрического датчика

Система настраивается на заданный температурный уровень с помощью регулировочного винта 2. При увеличении температуры относительно заданного уровня труба 10 расширяется, нижний конец винта 2 перемещается вниз и воздействует на головку рычага 4, последний поворачивается вокруг оси 5 и замыкает подвижный контакт 6 с контактом 7. При уменьшении температуры относительно заданного уровня под воздействием пружины 3 рычаг возвращается в исходное состояние, при этом замыкаются контакты 6 и 8. Таким образом, дилатометрический датчик имеет два выходных состояния, т. е. заранее обуславливает позиционный характер регулирования, что является основным его недостатком. К другим недостаткам относятся невысокая чувствительность и большая постоянная времени, т. е. большое запаздывание ввиду значительной инерционности трубы, являющейся одним из передаточных звеньев в цепи «температура - выходной сигнал».

Принцип действия пирометров основан на измерении суммарной энергии или состава излучения нагретых тел. Они позволяют измерять температуру в широких пределах, дистанционно. В зависимости от принципа действия их подразделяют на пирометры суммарного излучения, называемые также радиационными, яркостные или оптические пирометры, фотоэлектрические и цветковые пирометры.

Принцип действия радиационного пирометра основан на

измерении интегральной энергии излучения, пропорциональной 4-й степени температуры тела. Основой радиационного пирометра является телескоп, состоящий из теплоприемника и оптической системы, концентрирующей на теплоприемник суммарный лучистый поток тела, температура которого подлежит измерению. Теплоприемником обычно служат несколько термодпар, соединенных последовательно в термобатарее. Градуировку пирометров производят по абсолютно черному телу с коэффициентом лучеиспускания (черноты) $E = 1$. При измерении температуры реальных физических тел $E < 1$, поэтому пирометр показывает радиационную температуру T_p меньшую, чем истинная температура тела T , которая может быть определена по формуле:

$$T = T_p \sqrt[4]{1/E}, \quad (2.1)$$

При пользовании радиационным пирометром следует учитывать возможность появления погрешности, обусловленной поглощением теплового потока в промежуточной среде между телескопом и излучателем. Например, столб воздуха длиной 50 - 100 см поглощает при обычных условиях 3 - 6% лучистой энергии, что дает погрешность измерения 0,7 - 1,5%.

В качестве вторичных приборов для измерения термо-ЭДС батареи радиационного пирометра используют милливольтметры и электронные потенциометры.

Оптические или яркостные пирометры измеряют температуру по монохроматической яркости тела в видимой области спектра. Оптические пирометры, так же как и радиационные, градуируют по излучению абсолютно черного тела. Поэтому при измерении температур реальных тел с монохроматическим коэффициентом лучеиспускания $E < 1$ они показывают более низкую по сравнению с действительной, так называемую яркостную

монохроматическую температуру $T_{я}$. Истинная температура T с учетом поправки на неполноту излучения может быть определена по формуле:

$$T = \left(\frac{1}{T_{я}} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{E} \right)^{-1}, \quad (2.2)$$

где C_2 - постоянная Планка, λ - длина волны.

Монохроматическую яркость нагретого тела определяют, сравнивая его яркость с яркостью нити эталонной лампы, температура которой известна. Сравнение осуществляют двумя способами: изменением электрического тока в нити эталонной лампы до тех пор, пока ее яркость не сравняется с яркостью изображения тела и нить исчезнет на его фоне (пирометры с исчезающей нитью накала); изменением яркости изображения нагретого тела оптическим клином до тех пор, пока она не сравняется с яркостью нити эталонной лампы при постоянном токе в ней. Чувствительным элементом, определяющим совпадение яркостей эталонной нити и нагретого тела, служит обычно глаз человека, что исключает возможность производить автоматическую запись температуры и использовать пирометр в системах автоматического регулирования.

В фотоэлектрических пирометрах сравнение яркостей тела и нити лампы осуществляют фотоэлементом. В отечественном пирометре частичного излучения ФЭП-4 применяют вакуумные сурьмяно-цезиевые фотоэлементы со спектральной характеристикой, аналогичной характеристике глаза. Как и в яркостных пирометрах, с помощью красного светофильтра выделяется узкая спектральная область с эффективной длиной волны $\lambda_{эф}=0,65$ мкм. Принцип действия пирометра основан на периодическом (50 Гц) и поочередном освещении фотоэлемента нагретым телом, температура которого подлежит измерению, и лампой. Оба световых потока изменяются в противофазе. При их неравенстве в цепи фотоэлемента возникает переменная составляющая фототока,

которая после усиления воздействует на питание лампы. Ток накала лампы изменяется до тех пор, пока освещенности от измеряемого тела и лампы не уравниваются и переменная составляющая фототока не станет равной нулю. Таким образом, сила тока в лампе однозначно связана с температурой измеряемого тела. Выходной сигнал пирометра снимают с сопротивления, включенного в цепь питания лампы.

В цветковых пирометрах интенсивность монохроматического излучения тела измеряют, при какой либо температуре для двух участков длин волн, например, для красного и сине-зеленого участков видимой части спектра, отношение этих интенсивностей зависит от температуры. Это следует из закона Вина, согласно которому максимум интенсивности излучения с увеличением температуры смещается в область более коротких длин волн. Следовательно, измерив две яркостные температуры тела для разных монохроматических излучений с длинами волн λ_1 и λ_2 , можно по отношению этих температур найти так называемую цветовую температуру тела T_c . Истинную температуру тела определяют из выражения:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_c} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_2 (\lambda_1 - \lambda_2)} \ln \frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}}, \quad (2.3)$$

Пирометры имеют преимущества перед контактными преобразователями в следующих случаях:

- в температурных диапазонах и средах, где не может быть обеспечена долговременная устойчивость контактных преобразователей;

- при необходимости обеспечения высокого быстродействия;

- если контакт термоэлектрического преобразователя с объектом измерения затруднен или невозможен; если контакт термоэлектрического преобразователя с объектом измерения недопустим ввиду искажения им температурного поля.

Существенным недостатком пирометров является зависимость истинной температуры тела от коэффициента лучеиспускания, точная оценка которого в большинстве случаев затруднительна. Наиболее надежные значения истинной температуры могут быть получены в условиях, когда значение ϵ приближается к единице.

Основные характеристики отечественных пирометров, применяемых для измерения температуры в испытательных машинах, указаны в табл. 2.4.

Микропирометры ОМП-054, ВИМП-015М, ЛМП-066 и пирометр «Проминь» принадлежат к визуальным яркостным пирометрам с исчезающей нитью накала. Прибор ПИРС-019 представляет собой телескоп для измерения радиационной температуры. Приборы «Веселка» работают по принципу определения «цветовой» температуры. Их выпускают в виде пирометров и пирометрических преобразователей с унифицированными выходными сигналами ГСП. Микропирометр ФЭМП-021 и пирометр ФЭП-4 принадлежат к фотоэлектрическим пирометрам. Последний имеет объективы трех типов, а также линзы с разными фокусными расстояниями, что дает возможность работать при разных расстояниях от пирометра до объекта. Разработан агрегатный комплекс стационарных пирометрических преобразователей и пирометров типа АПИР-С, в него входят пирометрические преобразователи полного излучения - термоэлектрические (ППТ) и частичного излучения - фотодиодные (ПЧД), вторичные измерительные преобразователи преобразования сигнала первичного преобразователя в унифицированный выходной сигнал 0-5 мА; 0-100 мВ или 0-10 В.

Набором комбинаций функциональных блоков можно создавать различные модификации преобразователей в диапазоне 30 -2500 °С.

Таблица 2.4

Основные характеристики пирометров и пирометрических преобразователей

Тип пирометра	Основная погрешность, °С	Номинальное расстояние до объекта, мм	Диапазон измерений, мм
ОМП-054, ЛМП-066, ВИМП-015М	±12 ±14 ±20 ±50	170	400-850 · 800-1400 1200-2000 1800-4000
«Проминь»	±14 ±20 ±150	700	800-1400 1200-2000 1800-5000
ПИРС-019	±2 ±2,5 ±3 ±4,5	-	20-100 40-150 50-200 100 -300
«Веселка-1»	±0,6%	300	1400-1600 1550-1800 1700-2000 1900-2300 2200-2600
«Веселка 2»	±0,6%	300	750-950 900-1100 1000-131 1200-1500
«Веселка-3»	±1,5%	300	300-500 450-800
«Веселка-4»	±0,6%	300	1300-1800 1600-2200 2000-2800
	±1%		2500-3000
«Веселка-5»	±1,5%	300	500-800
	±1%		700-1100 900-1400
«Веселка-6»	±2%	300	200-500 300-700
	±1,5%		500-800

ФЭП4М	$\pm 1\%$	Св.200	500-900 600-1000 600-1100 800-1300 850-1400 900-1500 1000-1700 1100-1800
-------	-----------	--------	---

Логометры. Для измерения температуры с помощью термометров широко применяются магнитоэлектрические логометры. Логометр имеет подвижную часть, состоящую из двух жестко скрепленных под небольшим углом рамок [1].

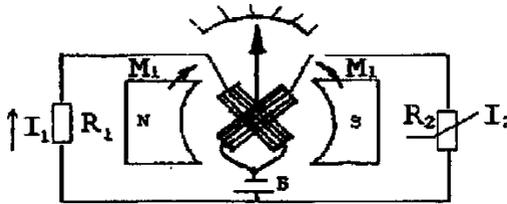


Рис. 2.2. Логометр

Действие прибора основано на измерении отношения токов, протекающих через рамки. Уравновешивание рамок достигается посредством взаимодействия противоположных вращающихся моментов рамок. Важно, что показания логометра не зависят от колебаний напряжения источника питания.

При изменении сопротивления R_2 от температуры меняются соответственно ток в одной из рамок и соотношение крутящих моментов M_1 и M_2 ; стрелка при этом отклоняется. Поскольку отклонение стрелки зависит только от изменения сопротивления то шкалу логометра можно градуировать в градусах Цельсия или Кельвина.

Для увеличения чувствительности логометр совмещают с измерительным мостом. В лабораторных условиях для измерения температуры довольно часто используются потенциометры типа ПП-63.

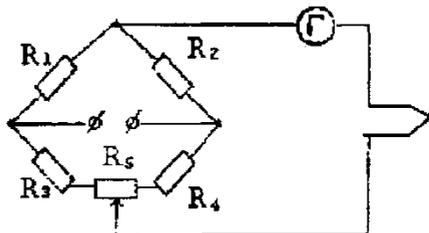


Рис. 2.3. Потенциометр ПП-63

где R_5 - магазин сопротивлений. Термо-ЭДС с термопары уравнивается до падения напряжения равного по величине, но обратного по знаку напряжению от источника тока, имеющегося на приборе.

Для измерения температуры используют усилители постоянного или переменного тока. Как правило, терморезистор включают в цепь обратной связи.

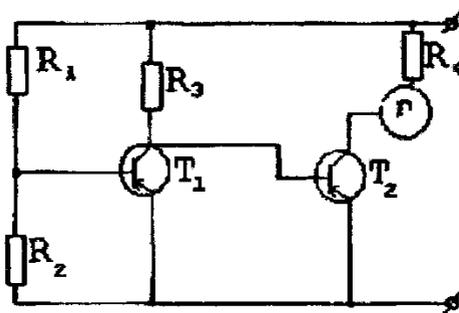


Рис. 2.4. Усилитель постоянного тока

2.2. Средства измерения влажности воздуха

Измерение и дистанционный контроль влажности воздуха осуществляют следующим образом.

1. Используют психрометрический метод, основанный на измерении температур двумя термометрами - сухим и влажным. Влажный термометр находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Испарение с поверхности влажного термометра происходит тем интенсивнее, чем ниже влажность окружающего воздуха. Разность показаний термометров зависит от значения влажности воздуха

Таблица 2.5

Зависимость разности показаний термометров от значения влажности воздуха

Показания «сухого» термометра, °С	Разность показаний „сухого“ и „мокрого“ термометров, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
10	100	88	76	65	51	44	34	24	14	4	-
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90-	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74.	66	59	51	44	34	30	24
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

2. Применяют метод точки росы, заключающийся в определении температуры, до которой необходимо охладить ненасыщенный воздух, чтобы довести его до состояния насыщения.

3. Определяют влажность воздуха с помощью

сорбционных гигрометров деформационного типа.

4. Определяют влажность воздуха с помощью гигрометров, принцип действия которых основан на зависимости механических свойств некоторых материалов от влажности окружающей среды.

К наиболее распространенным приборам этого типа относят волосяные гигрометры, использующие свойство обезжиренных волос изменять свою длину при изменении влажности воздуха. Точность измерения волосяных гигрометров не превышает $\pm 5\%$ Психометрический метод основан на зависимости между упругостью водяного пара e (в гПа) и показаниями сухого t_c и влажного t_v термометров

$$e = E_{\max} - A \cdot p \cdot (t_c - t_v), \quad (2.4)$$

где E_{\max} - максимально возможная упругость водяного пара при температуре t_a , гПа (табл. 2.8);

A - психометрический коэффициент, учитывающий скорость движения влажную воздуха.



Рис. 2.5. Психрометр

Для скорости воздуха 2-2,5 м/с, $A = 79,47 \cdot 10^{-5}$. Поскольку с уменьшением скорости коэффициент несколько увеличивается, для практических расчетов он может быть принят равным 10^{-3} , p - атмосферное давление, гПа. По этой формуле легко определить относительную влажность воздуха

как $\varphi = e/E$, где. E - максимальная упругость водяного пара при температуре t_c , гПа.

Точность психрометрического метода определяется главным образом погрешностями измерения температур t_c и t_w .

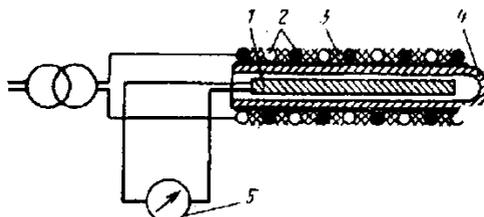


Рис. 2.6. Конструкция хлористолитиевого чувствительного элемента

Таблица 2.6

Значения максимальной упругости воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ гПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ гПа}$	$T, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ гПа}$
10	12,28	23	28,4	36	59,49
11	13.13	24	29,86	37	62,83
12	14.03	25	31.70	38	66,30
13	14,98	26	33.64	39	70,01
14	15.99	27	35,68	40	73,85
15	17,06	28	37.84	41	77,88
16	18,19	29	40,10	42	82.10
17	19,38	30	42,48	43	86,51
18	20,65	31	44,98	44	91,12
19	21,98	32	47,60	45	95,95
20	23,39	33	50,36	46	100,99
21	24.88	34	53,26	47	106,26
22	26,46	35	56,30	48	111,76

Для получения большей точности измерения в большинстве электрических психрометров предусмотрены устройства для аспирации воздуха с постоянной скоростью не ниже 3-4 м/с. Увлажняющий фитиль мокрого термометра должен обладать хорошей всасывающей способностью, при этом температура воды не должна значительно отличаться от температуры сухого термометра. К преимуществам психрометрического метода можно отнести достаточную точность при положительных температурах и не очень большую инерционность. В качестве чувствительного элемента могут применяться ртутные стеклянные термометры, термопреобразователи сопротивления, термисторы. Для смачивания термометра применяют 3%-ный раствор формальдегида.

Метод точки росы основан на зависимости:

$$\varphi = 100E_T/E_t, \quad (2.5)$$

где E_T - упругость насыщенного пара при температуре точки росы;

E_t - упругость насыщенного пара при температуре t .

При неизменном давлении точка росы не зависит от температуры воздуха. Погрешность определения относительной влажности методом точки росы прямо пропорциональна относительной влажности и погрешности измерения температуры и обратно пропорциональна квадрату абсолютной температуры точки росы.

При сорбционном методе о влажности судят по изменению электропроводности пленки, на которой нанесен поглотитель влаги - сорбент. Конструкция чувствительного элемента для измерения относительной влажности воздуха показана на рис 2.5. Чувствительный элемент состоит из изолированной металлической гильзы 4, покрытой стеклянным волокном 3, пропитанным водным раствором хлористого лития. Чувствительный элемент подогревают с помощью спирально намотанных электродов 2. Так как

солевой раствор хлористого лития хорошо проводит электрический ток, то цепь от вторичной обмотки понижающего трансформатора через электроды замыкается раствором соли хлористого лития. При этом вода, содержащаяся в растворе соли, испаряется, сопротивление раствора увеличивается и нагрев уменьшается. При испарении чувствительный элемент охлаждается и вследствие гигроскопичности соли хлористого лития начинает поглощать влагу из окружающей среды.

В установившемся режиме подведенная энергия полностью расходуется на испарение воды из солевого раствора. Таким образом, нагрев чувствительного элемента определяется величиной сопротивления солевого раствора хлористого лития, которое, в свою очередь, определяется относительной влажностью воздуха окружающей среды. Равновесие наступает при температуре точки росы. Эту температуру измеряют малоинерционным термопреобразователем сопротивления 1, помещенным в гильзу измерителя влажности и соединенным с измерительным прибором 5. Электролитические элементы применяют не только для измерения температуры точки росы, но и для измерения относительной влажности воздуха. В измерительных схемах используют неравновесные мостовые и компенсационные схемы.

2.3. Вакуумные машины и установки

При проектировании вакуумных машин и установок выбор откачных средств должен производиться с учетом физических явлений, лежащих в основе работы насосов различных типов, а также характерных особенностей их эксплуатации [2]. Существующие вакуумные насосы в зависимости от принципа действия можно разделить на несколько групп: 1) объемные, 2) инжекторные, 3) диффузионные, 4) молекулярные, 5) ионно-сорбционные, 6) криогенные.

К объемным насосам относятся вращательные, двухмоторные, поршневые и водокольцевые механические насосы. Принцип действия их основан на периодическом заполнении объема рабочей камеры насоса откачиваемым газом, последующим сжатием и вытеснением его в другой насос или в атмосферу. Наибольшее распространение получили вращательные насосы, которые в свою очередь делятся на пластинчато-роторные, пластинчато-статорные и плунжерные. Все они имеют рабочий орган, совершающий во время сжатия и вытеснения газа вращательное движение. Сжатие газа обеспечивается эксцентричным расположением осей ротора и статора и наличием разделяющей камеры всасывания и сжатия подвижной пластины, расположенной в пластинчато-роторных насосах в роторе, а в пластинчато-статорных - в статоре. В плунжерных насосах вместо разделительной пластины используется плунжер, совершающий карательное движение.

Во все вращательные насосы для улучшения условий трения движущихся частей и создания герметичного уплотнения масляной пленкой заливается рабочая жидкость - вакуумное масло ВМ-4 или ВМ-6. Пластинчато-роторные насосы обычно имеют не большую производительность. Их быстроты откачки при давлении 760-1 торр лежат в пределах от 0,1 до 6 л/с. Предельное давление $5 \cdot 10^{-2}$ торр для одноступенчатых и $5 \cdot 10^{-3}$ торр для двухступенчатых конструкций.

Основные характеристики современных пластинчато-роторных насосов представлены в табл. 2.7. Все насосы, кроме ВН-494 и ВН-01, снабжены газобалластными устройствами и могут откачивать пары воды при парциальном давлении 17 торр.

Газобалластное устройство напускает атмосферный воздух в камеру сжатия насоса, уменьшает коэффициент компрессий и предотвращает конденсацию паров воды внутри насоса.

Пластинчато-статорные насосы ВН-461М, ВН-461МГ и

РВН-20 имеют предельное давление $2 \cdot 10^{-2}$ торр при быстроте откачки несколько литров в секунду, а плунжерные ВН-2МГ, ВН-1МГ, ВН-4Г, ВН-6Г, ВН-300, ВН-500 имеют быстроты откачки десятки и сотни литров в секунду и предельное давление от 2 до $5 \cdot 10^{-2}$ торр. Все насосы, кроме РВН-20 и ВН-461М, снабжаются газобалластными устройствами. Все вращательные насосы являются источником миграции масла в откачиваемый сосуд, а в момент запуска наблюдается выбросы масла, защита от которых должна обеспечиваться маслоотбойниками и ловушками.

Таблица 2.7

Характеристики пластинчато-ротных насосов

Основные характеристики	ВН 494	ВН 01	ВН 01	НВР 0 25Д	НВР О 5Д	НВР 1Д
Быстрота откачки в диапазоне давлении 760-1 торр, л/с	0,21	0,1	0,1	0,25	0,5	1.0
Предельное остаточное давление, торр полное с газобалластным	-	-	-	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Без газобалласта	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Парциальное (по воздуху)	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Частота вращения ротора, об/мин	360	1390	1400	1400	1400	1400
Объем масла, заливаемого в насос, л	1,5	-	-	0,86	1,2	2,3
Мощность асинхронного трехфазного электродвигателя (50 Гц, 220/380 В), кВт-А	0,6	0,08	0,12	0,18	0,27	0,4
Диаметр впускного патрубка, мм	10	8	8	10	15	25
Габаритные размеры, мм Длина	437	140	306	330	380	450
Ширина	300	135	135	243	278	325
Высота	325	295	170	229	255	335
Масса насоса с приводом, кг	34,0	6,6	8,3	16,5	26,5	38,0

При остановке насоса, необходимо обеспечивать равенство давлений во всасывающем и выхлопном патрубках насоса, чтобы избежать выдавливания масла атмосферным давлением из насоса в вакуумную систему.

Удельные затраты мощности вращательных насосов в среднем составляют 400 Вт/(л/с).

Двухмоторные насосы откачивают газ, поступающий в пространство между двумя лемнискатообразными роторами, вращающимися в противоположные стороны. При скорости вращения роторов несколько тысяч оборотов в минуту можно в зависимости от размеров насоса получать быстроты откачки от десятков до тысяч литров в секунду. Из-за большого зазора между роторами (0,5мм) насосы не могут работать при высоких давлениях. Обратный поток газа, проходящий через зазоры, сильно растет в области вязкостного режима течения газа и снижает эффективность работы насосов. Максимальное рабочее давление двухмоторных насосов не превышает 1-10 торр. Таким образом, для их нормальной работы требуется форвакуумный насос.

К объемным вакуумным насосам относятся также часто применяемые в пищевой и химической промышленности многопластинчатые вращательные насосы, поршневые и водокольцевые насосы. Многопластинчатые насосы со скользящими лопастями выпускаются в одноступенчатом (типа РВН) и двухступенчатом исполнении (типа ДРВН). Предельное давление таких насосов в одноступенчатом варианте составляет 15 торр, а в двухступенчатом 4 торр. Быстрота откачки находится в пределах от 5 до 1000 л/с.

Водокольцевые насосы типа ВВН для откачки влажного воздуха, кислорода, агрессивных сред выпускаются для работы в диапазоне давлений от 760 до 100 торр с предельным давлением от 15 до 110 торр. Быстрота откачки таких насосов составляет 10 - 800 л/с.

Поршневые вакуумные насосы, выпускаемые промышленностью, бывают трех типов: с клапанным распределением и выравниванием давлений типа ВНК, с

принудительным распределением одноступенчатые типа ВНП и двухступенчатые типа ДВНП. Насосы типа ВНК имеют большую быстроту откачки (от 10 до 4000 л/с) при достаточно низком предельном давлении 38 торр. Предельное давление насоса ВНП равно 8 торр, а ДВНП - 0,3 торр при быстрота откачки от 10 до 400 л/с.

Насосы, относящиеся ко второй группе, - эжекторные - работают на принципе вязкостного увлечения газа струей жидкости или пара. Водоструйные насосы используются, для откачки воздуха от атмосферного давления до давления 15-20 торр.. В качестве примера таких насосов можно назвать насос типа ВВН-01. Этот насос имеет быстроту откачки в рабочем диапазоне давлений около 1 л/с, предельное остаточное давление 15 торр, применяется в качестве форвакуумного насоса при безмасляной откачке. Пароводяные насосы типа ЭП и ЭЭ имеют от двух до пяти последовательно включенных ступеней откачки и находят применение в нефтехимической и металлургической промышленности. При давлении рабочего пара 1МН/м² и его расхода от 100 до 4000 кг/ч быстрота откачки насосов лежит в пределах от 2 до 300 л/с. Расход охлаждающей воды соответственно изменяется от 4 до 150 м³/ч.

Пароводяные насосы типа НЭВ имеют в качестве последней ступени водоструйный насос и обеспечивают быстроту откачки от 5 до 30 л/с при предельном давлении 10 торр. Расход охлаждающей воды составляет 0,35-1,4 м³/ч. Паромасляные эжекторные насосы имеют максимальную быстроту откачки в диапазоне давлений от 10⁻² до 10⁰ торр. Наибольшее выпускное давление составляет несколько торр. Паромасляный эжекторный насос ЭН-50 потребляет мощность 1,5кВт и имеет максимальную быстроту откачки 60 л/с при 5·10⁻¹ торр. Быстрота откачки многоступенчатых паромасляных насосов достигает десятков тысяч литров в секунду.

Парортутные эжекторные насосы имеют повышенное выпускное давление. Например, четырехступенчатый насос

ЭН-100Р при быстроте откачки 100 л/с имеет наибольшее выпускное давление 50 торр. Опытные конструкции парожетторных насосов работают с выхлопом в атмосферу.

Третья группа насосов - диффузионные - получила наиболее широкое распространение для получения высокого и среднего вакуума. Принцип действия насосов основан на диффузии откачиваемого газа в струю, пара рабочей жидкости, вместе с которой газ уносится к следующей ступени откачки или форвакуумному насосу. Насосы наиболее эффективны в области высокого вакуума, когда скорость диффузии газа в струю, пара максимальна и не зависит от давления откачиваемого газа.

Диапазон рабочих давлений этих насосов лежит в пределах от 10^{-7} до 10^{-2} торр, быстроты откачки от 6 до 30 000 л/с, наибольшее выпускное давление 0,3 торр. Насосы изготавливаются многоступенчатыми, в качестве последней ступени применяется эжекторный насос.

На основе пароструйных насосов промышленность выпускает вакуумные агрегаты типа ВА. Агрегаты типов ВА-01-1, ВА-05-4, ВА-2-3, ВД-4, ВА-8-4 предназначены для общего применения и содержат эксцентриковый вакуумный затвор и жалюзную ловушку, охлаждаемую жидким азотом. Диаметр условного прохода высоковакуумного насоса, ловушки и затвора одинаковы. Конструкция элементов указанных агрегатов не допускает прогрева с целью обезгаживания, что ограничивает их предельное давление $5 \cdot 10^{-7}$ торр.

Агрегаты специального назначения типов ВА-05-5 и ВА-8-9М содержат прогреваемые до $300-400^{\circ}\text{C}$ вакуумный затвор и двухрядную азотную ловушку. Предельное давление этих агрегатов $5 \cdot 10^{-9}$ торр.

Среди паромасляных насосов выделяют группу бустерных насосов, в которых захват газа струёй пара происходит как за счет диффузии газа в струю, так и за счет турбулентно-вязкостного увлечения газа. По сравнению с диффузионными насосами у них значительно увеличена

мощность подогревателя, несколько изменена конструкция сопел и используются более стойкие рабочие жидкости (например, масло «Г»).

Диапазон рабочих давлений бустерных насосов 10⁻⁴-10⁻¹ торр лежит в области среднего вакуума. Ртуть в качестве рабочей жидкости, несмотря на токсичность и более высокую, чем у масел, упругость пара при комнатной температуре, применяется для безмасляной откачки масс-спектрометров, ускорителей и приборов с ртутным наполнением - мощных ртутных выпрямителей. Ртуть не разлагается при длительном нагреве и мало чувствительна к прорывам атмосферного воздуха в насос, что позволяет увеличить максимальное выпускное давление и срок службы насосов. В настоящее время разработано большое количество рабочих жидкостей для пароструйных насосов.

Откачивающее действие молекулярных насосов основано на увлечении молекул газа непрерывно движущимися твердыми поверхностями. Широкое распространение получили выпускаемые промышленностью турбомолекулярные насосы типа ТВН-200, ТМН-200, ТМН-500. Конструкция насосов напоминает собой осевой многоступенчатый компрессор с закрепленными на корпусе статорными дисками и вращающимися дисками, укрепленными на роторе. В статорных и роторных дисках выполнены косые прорезы зеркально по отношению друг к другу. Зазоры между подвижными и неподвижными дисками составляют примерно 1 мм, частота вращения ротора 18 000 об/мин. Насос ТМН-200 отличается от ТВН-200 встроенным приводом, расположенным в форвакуумной камере. Предельное остаточное давление, достигаемое этими насосами, составляет 5·10⁻⁹ торр. Диапазон рабочих давлений 10⁻⁸-10⁻² торр. Быстрота откачки у ТВН-200-200 л/с, у ТМН-200-250 л/с. На базе насоса ТВН-200 промышленностью выпускается высоковакуумный агрегат типа ТВА-200.

Преимуществом молекулярных насосов является отсутствие загрязнений в спектре остаточных газов, что

позволяет использовать их без ловушек. Следует, однако, отметить, что это преимущество проявляется лишь в прогреваемых вакуумных системах, так как во время остановки насоса масло проникает в откачиваемый объект. К недостаткам таких насосов следует отнести сложность ремонта и обезгаживания корпуса насоса.

Ионно-сорбционные и криогенные насосы принципиально отличаются от рассмотренных типов механических насосов тем, что откачиваемый ими газ не удаляется в атмосферу или в форвакуумный насос, а связывается физически или химически непосредственно в объеме самого насоса. Ионно-сорбционные насосы связывают газ двумя способами: ионной и сорбционной откачками. Ионная откачка осуществляется внедрением ускоренных ионов в электроды насоса. Сорбционная откачка происходит на активных поверхностях, обновляемых путем конденсации, на них термически испаряемого сорбционно-активного материала. В ионно-геттерных насосах типа ГИН с независимым распылением титана ток термокатода используется для электронной бомбардировки распылителя и ионизации газа внутри насоса. Ионизированный газ хорошо сортируется тремя способами: химическим взаимодействием с активным металлом, напыленным на стенки, ионной откачкой путем внедрения положительных ионов в материал стенок корпуса на глубину, пропорциональную энергии ионов, и физической адсорбцией путем «замуровывания» адсорбированных газов свеженапыленными пленками активного металла.

Ионно-сорбционными насосами с саморегулирующимся распылением активного металла являются магниторазрядные насосы типов НЭМ, НМДО (НОРД) и ТРИОН. Откачиваемые газы в таких насосах ионизируются первичными электронами, появляющимися за счет автоэлектронной эмиссии из катода. Средняя длина пути электронов в пространстве ионизации увеличена за счет воздействия на них перекрещивающихся электрического и магнитного полей. Положительные ионы

ионизированного газа, слабо отклоняющиеся магнитным полем, бомбардируют катод, изготовленный из сорбционного активного материала - титана. Пленка титана, распыляющаяся с катода, осаждается на аноде. Активные газы химически взаимодействуют с распыляемыми атомами материала катода и осаждаются на анод в виде химических соединений или непосредственно взаимодействуют со свеженапыленной пленкой на аноде. Инертные газы откачиваются внедрением в материал катода за счет ионной откачки. Насосы типа НМДО (НОРД) отличаются от насосов типа НЭМ тем, что имеют охлаждаемые водой электроды, способные устойчиво откачивать газы в более широком диапазоне давлений, и имеют повышенное давление запуска.

К криогенным насосам относятся адсорбционные и конденсационные насосы. Принцип действия основан на температурной обратимости явлений физической адсорбции. В качестве адсорбентов используются цеолиты, активированные угли, силикагели и др. Хладагентом в адсорбционных насосах является жидкий азот. Адсорбционные насосы могут работать от атмосферного давления. Предельно достигаемое остаточное давление адсорбционных насосов с неподвижным адсорбентом при откачке атмосферного воздуха составляет 10⁻³ торр. Оно ограничивается давлением плохо сорбирующихся газов, таких как Н₂, Не, входящих в состав воздуха.

Высоковакуумные агрегаты типа ЭРА состоят из насосов типа НЭМ и ЦВН. Конденсационные насосы охлаждаются до температур жидкого гелия или водорода.

По основным составляющим воздуха N₂, O₂, часто присутствующий в вакуумных системах СО быстроты откачки и другие характеристики насосов соответствуют паспортным данным. По другим компонентам остаточных газов в насосах различных типов возможны дискриминации по скорости откачки.

Водород хорошо откачивается пароструйными насосами с ловушками и без ловушек. Катализ в сорбционных

ловушках, разложение паров масла в термосорбционных и электронных ловушках приводят к обогащению спектра остаточных газов паромасляных насосов водородом. Турбомолекулярный насос откачивает водород с наименьшим коэффициентом компрессии по сравнению с остальными газами. Магниторазрядные насосы быстро насыщаются при откачке водорода, но в начальный момент скорость их откачки по водороду в три раза выше, чем по воздуху. Адсорбционные насосы, охлаждаемые до температуры жидкого азота, плохо откачивают водород. Конденсационные насосы, охлаждаемые до температуры жидкого водорода или гелия, также плохо откачивают водород. Гелий и неон хорошо откачиваются пароструйными и турбомолекулярными насосами, но со значительно меньшим коэффициентом компрессии по сравнению с воздухом. Адсорбционный и конденсационные насосы практически не откачивают гелий и неон. Во время работы магниторазрядных насосов наблюдается быстрое уменьшение быстроты откачки указанных газов, а начальное значение быстроты откачки не превышает 10-20% от быстроты откачки по воздуху. Углеводороды всегда присутствуют в спектре остаточных газов пароструйных и турбомолекулярных насосов, особенно в непрогрываемых вакуумных системах. Магниторазрядные насосы плохо откачивают пары масла и углеводороды, а пленки продуктов крекинга, покрывающие электроды, затрудняют откачку других газов. На чистых поверхностях титана при наличии углерода и водорода синтезируются метан и другие легкие углеводороды. Прекрасно откачивают углеводороды все виды криогенных насосов. Тяжелые углеводороды откачиваются адсорбционными насосами и ловушками даже при комнатной температуре. Пары воды и CO₂ хорошо откачиваются всеми видами насосов, особенно адсорбционными и конденсационными. Присутствие этих газов в больших количествах нежелательно в системах с адсорбционными ловушками. Хорошо адсорбируясь при комнатных температурах, после достижения равновесия они

могут вновь выделяться в вакуумную систему, создавая постоянный фон в спектре остаточных газов.

2.4. Силоизмерительные устройства с упругими динамометрами

Силоизмерительное устройство содержит силовоспринимающую и измерительную части [4]. Силовоспринимающая часть содержит элементы для восприятия реакций механической системы и передачи измеряемой силы на динамометр - основной элемент измерительной части, который содержит датчик силы, преобразующие, измерительные и регистрирующие устройства. В месте установки датчика возникает сила, противодействующая измеряемой - сила реакции датчика. По способу создания реакции можно выделить датчики трех типов:

1) с электрически неактивным упругим элементом, у которого реакция создается в результате деформации упругого электрически неактивного элемента - датчик раздельного преобразования;

2) с электрически активным упругим элементом, у которого реакция создается деформацией упругого электрически активного, т. е. одновременно чувствительного элемента, - датчик совмещенного преобразования;

3) с силовым уравниванием, у которого реакция создается силовозбуждающим устройством - механическим или электромеханическим.

К датчикам первого типа относят наиболее распространенные в настоящее время датчики силы. Упругий элемент этих датчиков выполняет чисто механические функции - создает реакцию измеряемой силе. Возникающая деформация упругого элемента воспринимается чувствительным элементом и преобразуется в выходную величину, т. е. процессы деформирования и преобразования происходят в различных элементах датчика.

К датчикам этого типа относят, например, датчики с механическими, тензорезисторными, индуктивными или емкостными преобразователями деформации в электрический сигнал.

В датчиках второго типа механическая нагрузка действует на электрически или магнитно активный упругий элемент, который реагирует на созданное нагрузкой поле механических напряжений или деформаций изменением своих электрических или магнитных характеристик. К датчикам этого типа относят, например, угольные, пьезоэлектрические и магнитоанизотропные датчики.

К датчикам третьего типа относят датчики с электродинамическим уравновешивающим силовозбуждающим устройством. В датчиках этого типа электрическое питание силовозбудителя цепью управления увеличивается настолько, что деформация упругого элемента в первом приближении устраняется, т. е. измеряемая сила уравновешивается силой возбудителя, а электрическое питание силовозбудителя является мерой измеряемой силы. Датчики этого типа нашли применение преимущественно при измерении малых и весьма малых сил.

Используемые в датчиках первого типа преобразователи можно разделить на параметрические и генераторные. В параметрических преобразователях энергия, отдаваемая в измерительную цепь в виде выходной величины, обеспечивается вспомогательным источником питания, а не отбирается у измеряемого объекта - источника силы. В генераторных преобразователях энергия, необходимая для создания выходной величины, отбирается у измеряемого объекта. У генераторных датчиков постоянная электрическая мощность может отбираться только тогда, когда источник силы обеспечивает необходимое непрерывное питание. Такое состояние возможно лишь в том случае, когда существуют временные изменения измеряемой силы.

Таким образом, параметрические преобразователи применяют в датчиках для измерения статических и

динамических сил, а генераторные - преимущественно в датчиках для динамических измерений. Конструкция датчика силы в большой мере определяется примененным преобразователем. Для достижения оптимальных метрологических характеристик датчика необходимо соблюдать следующие принципы: цельности конструкции, интегрирования, симметрии и оптимальных конструктивных границ.

В табл. 2.8 приведены основные типы датчиков силы и их основные достижимые параметры. На структурных схемах в таблице обозначено: 1 - упругий элемент датчика; 2 - преобразователь деформации упругого элемента в электрический сигнал; 3 - упругий и чувствительный элемент датчика; 4 - силовозбудитель.

Датчики силы с индуктивными преобразователями. Преобразователи, преобразующие естественную входную величину в виде перемещения в изменение индуктивности или взаимной индуктивности, называют индуктивными. Такой преобразователь состоит из одной или нескольких обмоток, расположенных на магнитопроводе. Изменение индуктивности или взаимной индуктивности происходит в связи с изменением длины воздушного зазора между элементами магнитопровода либо площади воздушного зазора. Рабочее перемещение элементов магнитопровода в преобразователях с изменяемой длиной зазора составляет 0,01- 10 мм, а в преобразователях с изменяемой площадью зазора 5-20 мм.

В табл. 2.7 приведены данные некоторых отечественных датчиков силы с индуктивными преобразователями.

Датчики силы с емкостными преобразователями. Емкостной преобразователь представляет собой простой или дифференциальный конденсатор, емкость C которого изменяется путем изменения расстояния b между его обкладками, либо путем изменения площади S обкладок, либо путем изменения диэлектрической постоянной ϵ материала, помещенного между обкладками. В датчиках силы емкостные

преобразователи реагируют на деформацию упругого элемента, преобразовывая ее в изменение емкости.

Таблица 2.8

Отечественные датчики силы с индуктивными преобразователями

Тип датчика	Диапазон измеряемых сил, кН	Класс	Осадка, мм	Диапазон рабочих температур, °С	Назначение
ДИ-250	0,25-2,5	1;2	0,5-2	От -30 до 50	Для
ДИ-500	0.5-5		0,5-1		дорожных
ДИ-	1,0-10		0,5-2		
ДИ-2000	2,0-20 5,0-50				Для весов
ДИ-	10,0-100				
ДИ-В	2-20 0,01-10	0,5	0,5	От -50 до 50	
ДИ				От -50 до+80	

Датчики силы с виброчастотными преобразователями. У этих датчиков измерительный ход действует на механический резонатор и изменяет частоту его собственных колебаний.

В качестве резонатора может быть использован механический элемент любой формы, способный совершать колебания. Наибольшее распространение получили струнные и стержневые резонаторы.

На рис. 2.6 изображен датчик силы со стержневым резонатором. При приложении к упругому элементу измеряемой силы Р резонатор 2 испытывает растягивающие (при измерении сжимающих кольцо сил) силы или сжимающие (при измерении растягивающих кольцо сил) силы. Частота поперечных колебаний в первом случае увеличивается, а во втором уменьшается по отношению к частоте колебаний резонатора ненагруженного датчика.

Резонатор 7 служит для температурной компенсации показаний датчика. Изменение частоты колебаний резонатора 7 происходит только в результате изменения температуры датчика силы, которая вызывает изменение модуля упругости

материала упругого элемента.

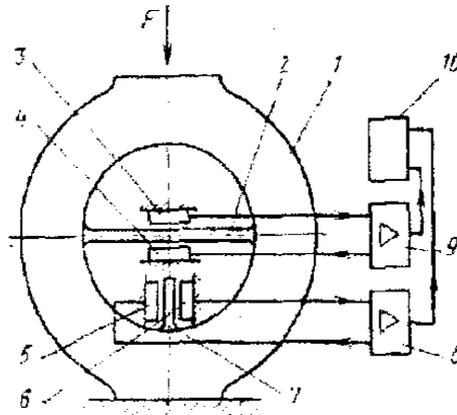


Рис. 2.7. Датчик силы со стержневым преобразователем

Датчики силы с тензорезисторными преобразователями. В основе работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников или полупроводников при их механической деформации. Квадратные структуры получают с максимальным использованием площади заготовки. Размеры квадратных структур - 6, 5, 4, 3, 2 и 1 мм. Толщина заготовок для структур обоих типов 20-25 мкм.

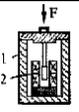
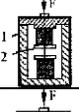
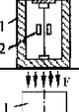
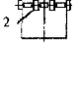
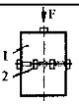
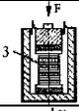
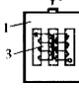
Применение таких структур (модулей), помимо значительного упрощения монтажа и сокращения числа контактов на полупроводнике (что повышает стабильность во времени), снижает погрешность от упругих несовершенств материала упругого элемента датчика силы. Использование этих модулей дает примерно такой же эффект миниатюризации, как применение планарных интегральных тензомостов.

В серийных зарубежных и отечественных датчиках силы используют мостовую схему включения тензорезисторов, питаемую напряжением U_n . Преимущество мостовой схемы заключается в том, что с ее помощью измеряют только

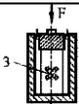
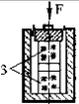
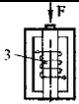
изменение сопротивления тензорезисторов R_1 ; R_2 ; R_3 и R_4 , а не общее их сопротивление. Балансировкой моста при отсутствии нагрузки на упругом элементе датчика силы можно исключить постоянную составляющую выходного сигнала. Можно сбалансировать мост тензорезисторов не при нулевой, а при какой-либо заданной нагрузке на упругий элемент датчика силы, что дает возможность измерять относительную силу. Для начальной балансировки моста в оба смежных плеча последовательно с тензорезисторами включают дополнительные регулировочные резисторы R_b . Мостовая схема позволяет простыми средствами обеспечить температурную компенсацию и снизить чувствительность датчика силы к не измеряемым компонентам силы. Для компенсации температурного изменения тензочувствительности тензорезисторов, приводящего к изменению чувствительности датчика силы, в цепь диагонали питания моста последовательно включают термочувствительные сопротивления R_{t2} , которые так регулируют напряжение питания моста, чтобы скомпенсировать изменение его чувствительности с изменением температуры. Установка термочувствительных резисторов R_{t1} и R_{t2} позволяет снизить температурную погрешность нуля R_{t1} и температурную погрешность чувствительности R_{t2} до 0,1-0,5% на 10 °С для проволочных и фольговых тензорезисторных датчиков силы. Данные об отечественных тензорезисторных датчиках силы приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.9

Основные типы и параметры датчиков

Структурная схема	Датчик	Интегрирование		Диапазон измеряемых сил, кН	Деформация упругого элемента, мм	Верхний предел рабочей частоты безприсоединённых масс, Гц	Достижимый температурный дрейф уля% градус	Нелинейность, %	Достижимый класс точности в диапазоне от -10 до 40°C	
		Мнимое	Действительное							
Параметрический с раздельным преобразованием										
	Индуктивный				10 ⁵ -10 ⁴	0,05-0,5	500	0,02-0,05	0,1-1	0,1-1
	Ёмкостный		+			200	0,01-0,05			0,25-1
	Вибросчетный					0,1-5·10 ³	0,1-0,25	1000	0,005-0,2	0,03-0,1
	Тензометрический Металлические тензорезисторные		+		10 ² -5·10 ⁴	0,05-0,3	5000	0,005-0,2	0,1-2	0,25-0,6
	Тензометрический Полупроводниковые тензорезисторные					0,02-0,1	10000	0,01-0,04	0,02-2	0,4-1
	Тензометрический Металлические тензорезисторные		+		10 ⁵ -10 ⁴	0,05-0,5	5000	0,001-0,005	0,01-0,1	0,01-0,06
	Тензометрический Полупроводниковые тензорезисторные					0,02-0,2	10000	0,005-0,04	0,1-0,3	0,1-0,25
Параметрический с совмещённым преобразованием										
	Резистивный с угольным столбиком		+	+	10 ⁻³ -10 ⁴	0,05-0,2	10000	0,1-0,5	2-30	>10
	Магнитоупругий. Изменение проницаемости		+		0,5-5·10 ⁴	0,02-0,2	>1000	0,02-0,05	1-5	1-2,5

Окончание табл. 2.9

	Магнитоупругий Анизотропные			0,5- 5·10 ⁴	0,02- 0,3		0,01- 0,05	0,1- 2	0,4 - 2,5
		+			0,03- 0,5	1000	0,003 -0,01	0,05 -0,5	0,1 - 0,6
Генераторный с совмещённым преобразователем									
	Пьезо- электрический **		+	1-5·10 ²	0,005- 0,05	100000	0,02	0,01- 1	<1
	Магнито- упругий	+					0,02- 0,05	1-5	2,5 -10
Компенсационный									
	Силовое уравновешивание		+	10 ⁻⁷ - 10 ²	0,1-1	100	0,001	0,01	0,025 -0,06

*Верхний предел рабочей частоты датчиков всех типов с максимально допустимой для них присоединённой массой не превышает 20-50 Гц.

**Нижний предел рабочей частоты пьезоэлектрических датчиков генераторного типа с совмещённым преобразованием частоты 10³ Гц.

Для статических измерений силы тензорезисторными датчиками отечественная промышленность выпускает различную аппаратуру, данные по которой приведены в табл. 2.10.

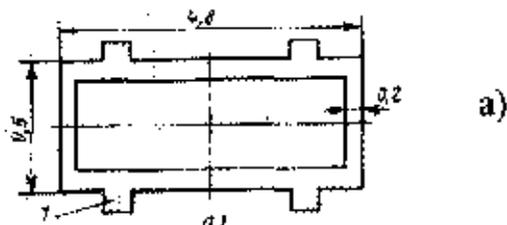


Рис. 2.8. Датчик силы с наклеиваемыми мостовыми полупроводниковыми структурами

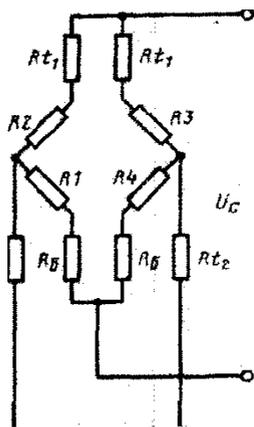


Рис. 2.9. Мостовая схема включения тензорезисторов

Таблица 2.10

Тензорезисторные датчики силы

Тип (модель)	Число типоразмеров	Номинальная нагрузка, кН	Основная погрешность, %	Не линейность, %	Гистерезис, %	Невоспроизводимость, %	Температурные изменения чувствительности, %	Диапазон температур, °С	Перегрузка	Осадка при номинальной	Вид нагрузки
СЗ и РЗ	16	0,01-500	0,04					От-30 до 40	1,25		С
ЭВ	3	750,1250, 1500	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Джк	1	600	0,8	-	-	-	-	10-35			С
ДЭМ-1	1	50	0,4	-	-	-		10-35	-	-	
ДЭВ	1	2000	0,8	-	-			10-35,		-	С
Вкэ	4	50, 100, 200,2000	0,2	-	-	-	-	От -20 до 50	-	-	С, Р.
ЭКВ-60	1	600	0,4	-	-			10-40		-	С
Свюоо	1	10	,0,25	-	-			От -40 до 50	-	-	С
СВ5000	1	50	0,25	-	-			От -40 до 50		-	С
Эдд-зо	1	300	0,4	-	-			От -40 до 50	2	-	С
ЭДД-250	1	2500	0,4	-	-			От -50 до 50	2		С
ЭДД-400	1	4000	0,4	-				От -40 до 50			С
ДМУ	1	100	0,2	-	-			0-35	1,5		С
ДТП	5	60-1000	0,3								
ДЭ4	1	2000	0,8	-	-			10-50		-	-
У	2	1,2	0,1-0,2	0,15	0,1	0,08	0,12	От -40 до 50	1,25	0,4	р/с
У	2	5,10	0,1-0,2	0,15	0,1	0,08	0,12	От-400 о 50	1,25	0,5	р/с

Таблица 2.11

Отечественная аппаратура для статических измерений силы
тензорезисторными датчиками

Прибор	Тип	Основная погрешность, %		Время измерения, с
Ручной компенсатор	ИСД-3	0,1	-	
Автоматический тензомер	ЭИД-8	0,1	-	
Автоматический тензомер	АПТ-100	0,5	-	4
Автоматический тензомер	ПДС-021	0,5	-	1
Компенсатор, самописец				
Автоматический	КСТ-4	0,25	-	1;2;5;8
Компенсатор, самописец				
Сило измеритель	ИСН-1	0,5	0,5	0,35
Испытательной машины, Самописец				
Силой измеритель	ИСДН	0,2	1,0	0-1000
Силой измеритель к испытательной машине	ПДН	-	1;3	20-1000
Динамометр, ручная компенсация	ЭДД	-	0,5	-
Тензовесы с компенсацией	ЭВН-60	0,5	-	1,5
Тензовесы с компенсацией	ПВ-10	0,25	-	1,5
	ДЭМПДД-	0,5	-	1,5
	ЭВН-50Б	1,0 0,5 0,5	-	1,5
	ЭКВ-60	-	-	1,5
			-	1,5
Тензовесы с ручной компенсацией	ЭВ-125А	-	0,4	

Датчики силы с магнитоупругими преобразователями можно разделить на две основные группы: с изменением магнитных характеристик упруго чувствительного элемента, с изменением степени магнитной анизотропии материала упруго чувствительного элемента.

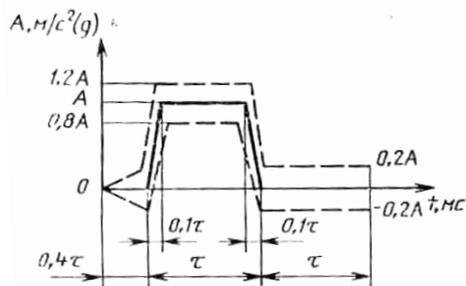


Рис. 2.10. Трапецеидальный импульс ударного воздействия

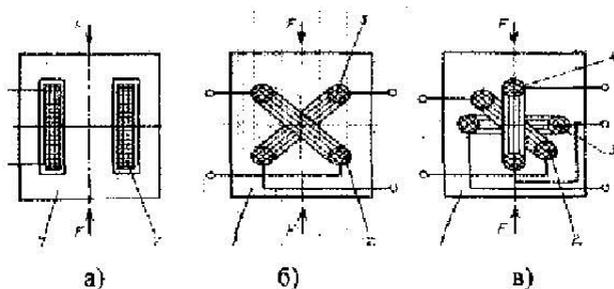


Рис. 2.11. Датчики силы с магнитоупругими преобразователями

Принцип действия датчиков первой группы (рис. 2.11, а) основан на том, что при приложении усилия к упругочувствительному элементу 1, который является одновременно магнитопроводом датчика, в нем изменяются магнитная проницаемость и величина магнитного потока, создаваемого обмоткой 2, питаемой переменным током; в результате изменяется ЭДС самоиндукции или взаимной индукции. На магнитопровод могут быть намотаны одна или несколько обмоток. В первом случае имеем магнитоупругий преобразователь дроссельного типа, во втором - трансформаторного. Принцип действия датчиков второй группы (рис. 2.11, б) основан на том, что под влиянием

внешних механических напряжений магнитные свойства материала упруго чувствительного элемента 1 из-за анизотропии магнитных свойств кристаллов железа претерпевают изменения во всех направлениях с различной интенсивностью и с различными знаками в зависимости от величины внешнего магнитного поля. Суммарный вектор магнитного потока, сцепленного с катушкой 2 возбуждения, направлен внутри магнитопровода 1 под углом 45° к векторам главных механических напряжений. Магнитная ось измерительной катушки 3 расположена перпендикулярно к оси катушки возбуждения, благодаря чему при отсутствии измеряемой силы P потокосцепление между катушками, а следовательно, и коэффициент взаимоиנדукции равны нулю. При действии силы P магнитное поле внутри магнитопровода (упругочувствительного элемента) становится асимметричным, поэтому появляется составляющая магнитного потока, сцепленная с измерительной катушкой, в которой наводится ЭДС, являющаяся функцией измеряемого усилия.

Тензометры. При измерении напряженно-деформированных состояний деталей и агрегатов при их эксплуатации используют ряд методов тензометрии, в основу которых положены различные физические принципы измерений. Существуют рентгеновские методы, методы фотоупругости, муаровых полос, хрупких покрытий, гальванических покрытий и методы с использованием тензометрических преобразователей. Сущность рентгеновского метода измерения основана на явлении интерференции рентгеновских лучей, проходящих через кристаллическую решетку исследуемого материала. В основу метода хрупких покрытий положен эффект образования трещин под действием приложенных нагрузок.

Таблица 2.12

Отечественные датчики силы с магнитоупругими преобразователями

Тип	Номинальная измеряемая сила, кН	Основная Погрешность, %	Температурная погрешность, % на 10°C	Диапазон рабочих температур, °С	Перегрузка (кратность)
МКН	50; 60; 160	2,5	-	От -25 до 50	-
ДНР	20; 30; 45	1,5	1	От -30 до 50	2
ДНС	10; 16; 24; 40 50; 100; 250	1,5	1	От -30 до 50	2
ДМУ Глубинный	30	1,5	1,2-1,6	-	1,6
	15	5	5	От -30 до 50	-
Поршневой	0,05	1,5	0,5	-	1,5
Глубинный	40	1	0,3	От -20 до 50	-
	36; 50	2-3 0,5	1,25	От -40 до 60	-
Для прокатных станов	3000; 8000; 10000; 12 000;		0,5	-	1,5
	15000;	2-3			
Многоэлементный	20000		-	От -30 до 70	1,5
	2,5	0,5	0,5	-	1,5

Покрытия предварительно наносят на объект исследования, и после высыхания в этом покрытии образуются остаточные напряжения, которые и способствуют, даже при незначительных деформациях, образованию трещин. Метод хрупких покрытий применяют для предварительного определения зоны наибольших напряжений. Ввиду того, что погрешность определения деформаций и напряжений методом хрупких покрытий достигает 10-20 %, этот метод используют только для оценочных измерений, более точные результаты получают применением других средств точного тензометрирования.

Метод гальванических покрытий основан на образовании темных пятен на медном гальваническом покрытии, нанесенном на исследуемый объект. Этот метод используют в основном при циклическом нагружении объекта. При известном числе циклов нагружения, модуле упругости материала объекта и химическом составе

гальванического покрытия определяют минимальное значение напряжения, при котором появляются темные пятна на гальваническом покрытии. Другими словами, значения числа циклов нагружения и величина напряжения, соответствующие этим циклам нагружения, являются взаимосвязанными величинами. Метод фотоупругости основан на использовании явления двойного лучепреломления у прозрачных материалов под действием механических напряжений. При этом величина двойного лучепреломления пропорциональна значениям деформации объекта, которая определяется порядком интерференционных полос при просвечивании материала поляризованным светом. К преимуществам метода фотоупругости следует отнести возможность измерения напряженного состояния всей поверхности объекта при визуальном контроле, высокую точность измерения. Однако указанный метод имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что измерения проводят на моделях и это представляет определенные трудности при испытаниях объемных моделей.

В основе метода муаровых полос лежит муаровый эффект, суть которого заключается в появлении чередующихся темных и светлых полос при наложении одной на другую двух или более растровых сеток. Шаг муаровых полос определяется параметрами исходных растворов и условиями их освещения. Один из растров наносят на испытываемый объект и деформируют вместе с ним.

Муаровая картина несет информацию о характере деформирования раstra и деформированного состояния образца. При незначительных относительных деформациях, линейных и угловых перемещениях сеток наблюдаются большие изменения шага, направления и положения возникающих муаровых полос. Метод муаровых полос применим как для натуральных объектов, так и для моделей объектов. Муаровые полосы наносят либо посредством фотопленок со съёмным эмульсионным слоем или фотохимическим способом путем травления. К

преимуществам метода следует отнести возможность измерения деформаций больших поверхностей и при высоких температурах. Схема установки, называемой муаровой скамьей, для измерения методом муаровых полос перемещений и деформаций на поверхности деталей или элементов конструкции, испытываемых при статическом, циклическом или динамическом нагружении в условиях нормальных, повышенных температур или при воздействии среды, приведена на рис. 2.12. При использовании такой схемы

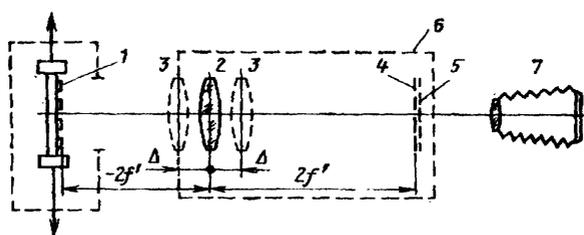


Рис. 2.12. Схема муаровой скамьи

осуществляют дистанционное наложение контрольного и рабочего растров 7, так как изображение рабочего раstra, нанесенного на испытываемую деталь, смонтированную в захватах испытательной машины, проецируется объективами 2 и 3 в фокальную плоскость специальной фотокамеры 6, где устанавливается также контрольный растр 5. При совмещении изображений рабочего 4 и контрольного растров возникает картина муаровых полос, которую регистрируют фотокамерой 7. Применение такой оптической системы позволяет осуществлять измерение полей деформаций без остановки испытаний, причем испытываемый образец или элемент конструкции может быть размещен в нагревательной или климатической камере, имеющей соответствующее окно для наблюдения за исследуемой поверхностью и смонтированной на испытательной машине. С использованием специальных приспособлений, устанавливаемых на объективе скамьи и позволяющих осуществлять тонкие фиксированные

перемещения объектива, оказывается возможным эффективно увеличить объем получаемой информации о перемещениях на исследуемой поверхности. При измерении полей деформаций с помощью метода оптически активных (фотоупругих) покрытий приборы, используемые для измерения разности хода лучей в покрытии (т.е. - для измерения разности главных деформаций и для определения направлений главных осей), называют полярископами одностороннего действия.

Для измерения полей малых перемещений точек поверхности материалов элементов конструкций эффективно применяют метод голографической интерферометрии, основанный на использовании когерентных источников света.

Для исследования стационарных объектов и медленно протекающих процессов в основном применяют голографические установки типов УИГ-2М, УИГ-2А и интерферометрический стол для регистрации быстротекущих процессов - установку типа УИГ-1М.

Установки указанных типов со сложными системами антивибрационной изоляции позволяют вести исследования объектов как в проходящем, так и в отраженном свете, они оснащены оптическими компонентами, необходимыми для проведения голографических исследований. Вместе с тем недостаточная помехоустойчивость этих установок, громоздкость, значительная стоимость существенно осложняют, а в ряде случаев и исключают их применение в комплекте с испытательными машинами при механических испытаниях материалов и конструкций. Для устранения влияния вибрации и связанной с ней необходимости использования массивных виброизолированных столов применяют специализированные методы голографирования с лазерами непрерывного излучения или импульсными. Применение голографии с импульсным лазером с весьма малой длительностью импульса (20-30 нс) позволяет устранить влияние вибрации как при голографии с помощью одиночного импульса, так и при работе по схеме с двумя экспозициями. Так, при одиночном импульсе длительностью

около 30 нс допускаемая скорость движения объекта не должна превышать 2,9 м/с, а интервал между парными импульсами, не превышающий 50 мкс, обеспечивает устранение влияния вибраций при частотах до 2000 Гц.

В случаях, когда по каким-либо причинам целесообразно использовать не импульсные системы, а установки с лазером непрерывного излучения, применяют различные методы компенсации вибраций, которые условно можно подразделить на три основных класса: методы с использованием локального опорного пучка, формируемого излучением, рассеиваемым объектом; методы использования сервосистем с обратной связью и методы, снижающие время экспозиции. Система для автоматического контроля деформаций на основе использования голографического интерферометра с оптоэлектронным преобразователем предназначена для управления процессом диффузионной сварки с одновременным дефектоскопическим контролем, а также может быть использована для механических испытаний с заданными скоростями и величинами деформаций при нагружениях образцов в термо -, криокамерах или вакуумных камерах. Принципиальная схема устройства представлена на рис. 2.13. Излучение лазера 1 разделяется светоделителем 2 и зеркалом 13 на два потока, которые расширяются и коллимируются системами 3. Более яркий поток, проходя через пластинку 4, попадает в камеру 5.

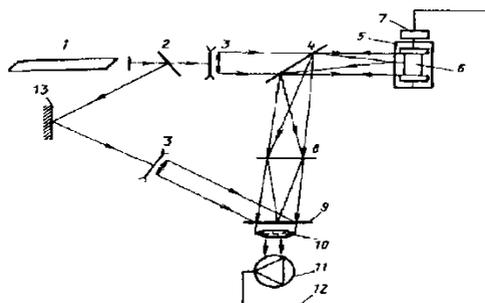


Рис. 2.13. Схема установки для автоматического контроля деформаций на основе интерферометра

Отражаясь от поверхности образца 6, пучок выходит из камеры по тому же оптическому пути и через объектив 8 попадает на фотопластинку 9, где записывается голограмма. Попадающий в процессе нагружения на оптоэлектронный преобразователь через линзу 10 световой поток предварительно проходит через голографическую интерферограмму и оказывается модулированным пространственной частотой, локализацией и формой интерференционных полос. В блоке сравнения происходит сопоставление заданной и реализуемой скоростей изменения фототока, т. е., по существу, заданной и измеряемой скоростей деформирования. При неравенстве скоростей возникает сигнал рассогласования, поступающий через линию обратной связи 12 в блок управления золотником гидравлического нагружающего устройства 7, и осуществляется автоматическая корректировка параметров процесса нагружения.

Для измерения напряжений наибольшее распространение получили тензометры, основанные на использовании тензометрических преобразователей: механические, оптические, пневматические, струнные (акустические) и электрические.

Действие механических тензометров основано на масштабном преобразовании деформаций с помощью механической передачи до величины, удобной для регистрации. Для этой цели используют рычажные и рычажно-зубчатые передачи. На рис. 2.13 приведен рычажный тензометр Гугенбергера, используемый только для измерения статических деформаций.

Подвижная призма является одним из концов двухплечевого рычага. Тензометр закрепляют на объекте исследований с помощью струбцинок, вакуумных присосов или магнитов. Расстояние между призмами составляет базу тензометра. Погрешность тензометра Гугенбергера с базой 20 мм составляет величину около 15 ед.

Механические тензометры обычно используют для

предварительной оценки распределения деформаций на объекте. В оптических тензометрах для преобразования деформаций в удобную для регистрации величину используют оптический луч. При этом отсчет можно производить по перемещению светового пятна на шкале. В оптических тензометрах, которые предназначены для измерения больших деформаций, используют фотоэлектрические датчики. При этом деформация преобразуется в электрический импульс. Схема оптического тензометра с фотодиодами приведена на рис. 2.15.

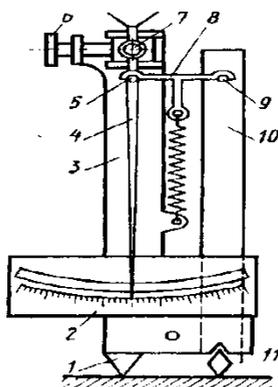


Рис. 2.14. Рычажный тензометр Гугенберга

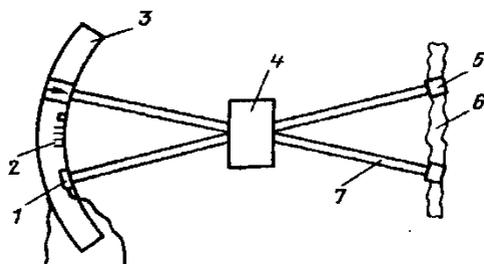


Рис. 2.15. Схема оптического тензометра с фотодиодом

Рычаги 7, ось вращения которых находится в корпусе тензометра 4, закреплены на образце б зажимами 5. На одном из рычагов закреплена считывающая головка 7, в которой размещены источник света и фотодиод, а на другом рычаге -

прозрачная шкала 3 со штрихами 2. При деформации объекта считывающая головка перемещается вдоль шкалы, а с фотодиода поступают на вторичную аппаратуру импульсы, число которых пропорционально деформации. Точность измерения зависит от числа делений на шкале и поэтому габариты такого устройства относительно больше, так как надо увеличивать длину рычагов и размеры шкалы.

Действие пневматического тензометра основано на изменении расхода воздуха через измерительное сопло, перепад давления измеряют посредством U-образного водяного манометра. Деформация поверхности исследуемого объекта воспринимается опорными призмами и через рычаг механической передачи изменяет величину сечения сопла. Коэффициент передачи пневматического тензометра достигает 200000. Линеаризация градуировочной характеристики обеспечивается дифференциальным включением двух измерительных сопел, установленных встречно и разделенных диафрагмой. К недостаткам данных тензометров относят повышенные требования к чистоте воздушных потоков, их применяют в основном для лабораторных измерений.

В струнных (акустических) тензомерах используется изменение частоты собственных колебаний струны при деформации объекта. Собственная частота колебаний струны зависит от величины механического напряжения в струне. Измеряя частоту колебаний струны, можно судить о деформации объекта. Над струной установлен электромагнит для возбуждения колебаний в струне при прохождении по его обмотке электрических импульсов. Частоту колебаний струны измеряют посредством сигнала, снимаемого с обмотки электромагнита. Струнный тензомер является частотным прибором и поэтому имеет определенные преимущества с точки зрения помехозащищенности и влияния внешних электрических флуктуаций на показания тензомера. Для измерения изменения частоты, вызванной деформациями объекта, используют частотные дискриминаторы или

цифровые счетчики. Погрешность измерения струнных тензометров 1 е.д.

Большая точность струнных тензометров и многообразие схем обработки частотно-модулированных сигналов позволяют использовать эти тензометры для измерения как статических, так и динамических деформаций.

В основу работы электрических тензометров положен принцип измерения изменения параметров электрической цепи, например сопротивления, индуктивности или емкости. Электрические тензометры делят на тензометры сопротивления, индуктивные, емкостные, пьезоэлектрические, индукционные.

Действие потенциметрического тензометра сопротивления основано на измерении величины сопротивления между ползунком потенциметра, механически связанным с опорной призмой, образующей базу, и крайним выводом потенциметра.

Потенциметрические тензометры применяют для измерения деформаций до десятых долей миллиметра. В электролитических тензометрах измеряют изменение сопротивления между выводами двух электродов, находящихся в электролите, под действием деформации. Стабильность таких тензометров невысокая.

Действие механотронных тензометров основано на использовании эффекта изменения внутреннего сопротивления вакуумной электронной или газонаполненной лампы при изменении под действием деформации расстояния между электродами. Для повышения чувствительности преобразования используют триоды. С целью линейаризации характеристики механотронного тензометра используют диод с двумя подвижными анодами, которые легко включаются в дифференциальную схему. Изменение электрической емкости между двумя пластинами, вызванное перемещением одной из пластин под действием деформации, положено в основу емкостных тензометров. Однако емкостным тензометрам присущи недостатки емкостных датчиков, такие как влияние

пыли, влаги, температуры окружающей среды, и поэтому эти тензометры не получили должного распространения.

В индуктивных тензометрах используется изменение реактивного сопротивления катушки от действия деформации. Различают индуктивные тензометры с поперечным перемещением якоря, в котором изменяется зазор в магнитопроводе, тензометры с продольным перемещением якоря, при котором изменяется объем сердечника в полости катушки и тензометры с переменной магнитной проницаемостью. Конструкция индуктивного тензометра с продольным перемещением якоря приведена на рис. 2.16.

Подвижная призма 1 через рычаг 2 и тягу 3 передает перемещение якорю 4, который может перемещаться внутри двух катушек 5. Перемещение сердечника внутри катушек приводит к изменению коэффициента взаимной индукции катушек, что вызывает электрический выходной сигнал, пропорциональный измеряемой деформации. Индуктивные тензометры с продольным перемещением якоря имеют большую базу (10- 100 мм). Эти тензометры применяют для измерения деформаций больших конструкций. Преимуществом таких тензометров является нечувствительность к внешним воздействиям.

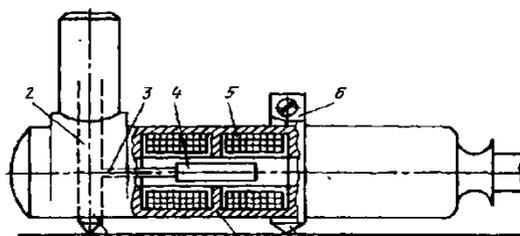


Рис. 2.16. Индуктивный тензометр с продольным перемещением якоря

Индуктивные тензометры с переменной магнитной проницаемостью основаны на использовании магнитоупругих преобразователей, проницаемость сердечника которых

изменяется в зависимости от возникающих в них механических напряжений, обусловленных воздействием внешних механических сил. Магнитоупругие сердечники преобразователя характеризуются относительной магнитоупругой чувствительностью. Размеры сердечников выбирают по допустимому механическому напряжению в материале. Максимальное напряжение не должно превышать (3-5)10 МПа для никеля и пермаллоев и (1 - 1,2)10² МПа для трансформаторных сталей и пермендюров.

Существует большой класс тензометров, действие которых основано на принципе изменения сопротивления металлов или полупроводников под действием деформаций. Чувствительными элементами таких тензометров являются тензорезисторы, которые обычно наклеивают на упругие элементы, преобразующие измеряемую механическую величину в деформацию упругого элемента. На рис. 2.17 показана схема чувствительного упругого элемента с тензорезисторным преобразователем для измерения механических величин.

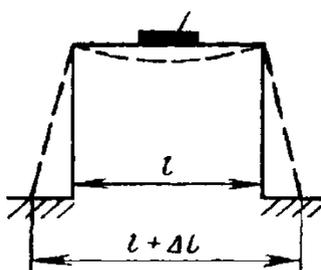


Рис. 2.17. Чувствительный упругий элемент с тензорезисторным преобразователем

На П образную скобу наклеивают тензорезистор Т, перемещения опорных концов скобы вызывают изгиб и деформацию верхней части скобы. Скоба является преобразователем перемещений. Сигнал с тензорезистора поступает на схему обработки и регистрации. Одной из

важнейших частей тензометров данного класса является упругий элемент, на который наклеивают тензорезистор. Выбор конструкции упругого элемента, материала, из которого его изготавливают, определяется многими факторами, такими как объект исследования, диапазон измерения деформаций и допустимая погрешность. В практике измерений получили распространение проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы.

Проволочные тензорезисторы используют в качестве чувствительного элемента решетку, выполненную из тонкой проволоки диаметром 2 - 30 мкм, полученной методом волочения или микрометаллургии.

Проволочные одноэлементные тензорезисторы в зависимости от вида чувствительного элемента подразделяют на пять групп:

- общего назначения с плоской петлевой решеткой из натянутой проволоки диаметром 10 - 30 мкм с базами $L_p = 2 - 100$ мм (рис. 2.18,а); с двухслойной петлевой решеткой базами 1-3 мм (рис. 2.18,б); с плоской беспетлевой многопроволочной решеткой из тянутой проволоки диаметром 10-30 мкм с базами $L_p = 3 - 200$ мм (рис. 2.18,в); беспетлевые однопроволочные из тянутой проволоки диаметром 10 - 20 мкм с базами L_p от 10 мм и выше (рис. 2.18,г);

- беспетлевые однопроволочные из жилы литого микропровода диаметром 2-6 мкм с базами $L_p = 1-3$ мм (рис. 2.17,д).

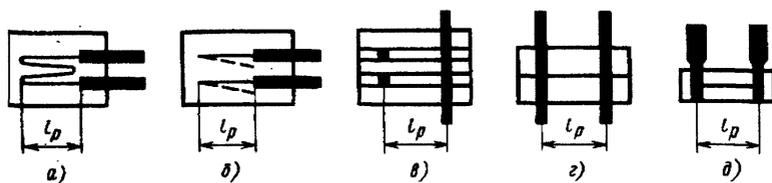


Рис. 2.18. Схемы проволочных одноэлементных тензорезисторов

При измерении сил, деформаций в нескольких

направлениях применяют многоэлементные тензорезисторы, так называемые розетки (рис. 2.19), которые образованы из двух, трех или четырех линейных тензочувствительных элементов на одной общей основе. Коэффициент тензочувствительности проволочных тензорезисторов равен $2,0 \pm 0,2$. Номинальный рабочий ток - около 30 мА, предел измерения относительных деформаций 0,003, поперечная чувствительность составляет 2 % от продольной.

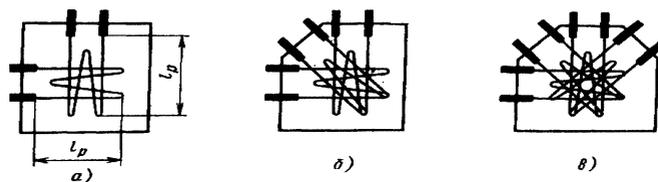


Рис. 2.19. Схемы многоэлементных тензорезисторов

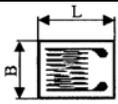
Беспетлевые тензорезисторы свободны от поперечной чувствительности, отличаются большей стабильностью при длительных измерениях. В качестве основы для пленки проволочных тензорезисторов используют бакелитовый лак, клей БФ-2. Резисторы изготовленные на пленке из клея БФ-2, способны работать при температурах от -40 до 70 °С, а на бакелитовом лаке - до 200 °С. Для высокотемпературных тензорезисторов используют клеи В-58, ВН-15, выдерживающее температуру до 400 °С, или цементы Б-бб, ВН-12 при измерениях до 800 °С.

Фольговые тензорезисторы имеют решетку не из круглого провода, а из тонких полосок фольги прямоугольного сечения толщиной 4-12 мкм, которые наносят на пленку из синтетической смолы или бумаги, пропитанной клеем. Толщина пленочного основания тензорезистора составляет 30-40 мкм, бумажного 80- 100 мкм. В связи с большей теплоотдачей фольговых тензорезисторов ток, протекающий через преобразователь, может составлять 0,5А, что повышает чувствительность тензопреобразователя. В качестве основы используют пленку из лака ВЛ-931, клея БФ-

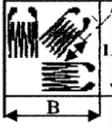
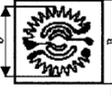
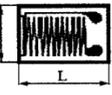
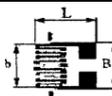
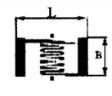
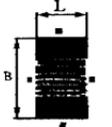
2 и бумагу. Основные характеристики фольговых тензорезисторов приведены в табл. 4.6. Температурный диапазон фольговых тензорезисторов 1ФКТК и 2ФКТК от -50 до 50 °С, а 3ФКТК- от 10 до 200 °С, предельная измеряемая относительная деформация 0,003.

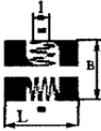
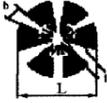
Таблица 2.13

Фольговые тензорезисторы

Тип	Эскиз	Сопротивление, Ом	Рабочий ток, мА	Рабочий диапазон t, °С	I	L	b	B	Материал основы	Тип связующего
					мм					
2ФК ПА		50	15	От -40 до 70	1	7	5	-	Плёнка ВЛ-931	Циакрин
		100			3	9	6			
		50			5	11	8			
		100	40-50		5	11	9,5			
		200			5	11	6			
		50			10	20	11			
		100			10	20	13			
		200			10	20	13			
100	40-50	20	30	9						
200		20	30	15						
1ФК ТК		100	30	От -40 до 50	5	14	8	-	Плёнка БФ-2	БФ-2
		200			5	14	13			
		100			10	19	6			
		200			10	19	8			
		400			1015	19	13			
		100			15	24	5			
		200			15	24	6,5			
400	24	24	10							
2ФК ТК		100	30	От -40 до 50	5	14	8	-	Бумага	ВК-9
		200			5	14	13			
		100			10	19	6			
		200			10	19	8			
3ФК ТК		400	30	От 10 до 200	10	19	13	-	Бумага	ВК-9
		100			15	24	5			
		300			15	24	6,5			
		400			15	24	10			
		100			5	14	8			
		200			5	14	13			
		100			10	19	6			
		200			10	19	8			
		400			10	19	13			
		100			15	24	5			
		300			15	24	6,5			
		400			15	24	10			

Продолжение табл. 2.13

ФКР Г		500 100 100	40-50	От - 40 до70	5 5 10	21 30 32	21 20 32	-	Плёнка ВЛ-931	ВЛ- 931
2ФК МВ		100 50 100 100 200	15 40- 500		-	-	10 20 20 30 30	12 24 24 34 34		
2ФК МТ		50 100 100 200	40-50		-	-	20 20 30 30	24 24 34 34		
2ФК ПД		50 100 200	50 40- 50 15	От - 40 до 70	5 5 5	24 37 37	-	-	Плёнка ВЛ-4	Циакрин
ФК- ПА		70 140	15		0,8 1,8	2 3,2	0,94	1,5		
ФК- ПБ		70	15		0,8	3,8	1,1	1,5		
ФК- ПВ		140	15		1,8	2,82	1,1	2,0		
2ФК РВ		100	15	От - 40 до 70	3 5 5	9 16 23	7 16 19	- - -	Плёнка ВЛ-931	ВЛ- 931
		50 100	40- 50		10 0,8	23 3	21 1,1	- 2,26		
		100 70	15							

ФК-РА		110	15		1,8	4,2	1,1	4,2	Плёнка ВЛ-4	ВЛ-4
ФК-РБ		70 140	15		0,8 1,8	6 8	1,1 1,1	-	Плёнка ВЛ-4	ВЛ-4

В полупроводниковых тензорезисторах в качестве чувствительного элемента используют монокристаллический полупроводник толщиной 20-50 мкм, шириной до 0,5 мм и длиной 2-12 мм. Особенностью полупроводниковых тензорезисторов является их высокая чувствительность, в 50-60 раз превышающая чувствительность проволочных тензорезисторов, и большой уровень выходного сигнала (0,1 В и более). Сопротивление полупроводникового тензорезистора при одних и тех же размерах посредством добавления присадок и выбора определенной технологии изготовления может меняться от 100 Ом до 50 кОм. Тензорезисторы из кремния и германия обладают высокой чувствительностью, химически инертны и выдерживают нагрев до 500-540 °С. Конструкции полупроводниковых тензорезисторов приведены на рис. 2.20 а (серия КТЭ и КТД) и рис. 2.20 б (серия Ю-8).

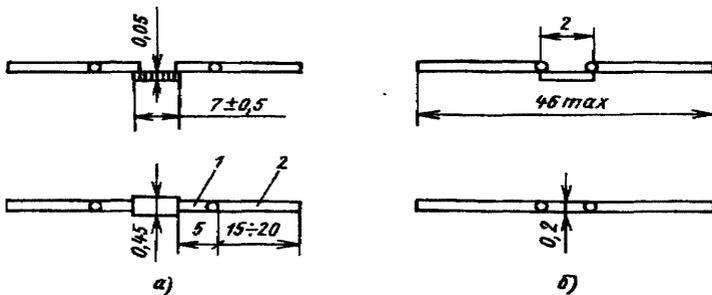


Рис. 2.20. Полупроводниковые тензорезисторы

Вывод тензорезистора имеет два участка. Участок 1 обеспечивает сварку с полупроводником, участок 2 используют для монтажа в схемах. Тензорезисторы КТД имеют проводимость р-типа, а КТЭ - n-типа. Коэффициент тензочувствительности этих тензорезисторов равен 120 ± 20 , номинальный ток 15 мА, рабочий диапазон температур от -160 до 300. °С, температурный коэффициент сопротивления 0,45 % - °С, предельно измеряемая деформация 0,004. Коэффициент тензочувствительности равен 100 ± 10 , номинальный рабочий ток для Ю-8 15 мА, для тензорезисторов Ю-12 10 мА, диапазон рабочих температур от -60 до 115°С. К недостаткам полупроводниковых тензорезисторов следует отнести их малую механическую прочность, высокую чувствительность к воздействию внешних условий и существенный разброс характеристик от образца к образцу. При измерении динамических нагрузок имеется ряд особенностей.

Длительность надежной работы при циклических и вибрационных нагрузках определяется для тензорезисторов их собственной динамической стойкостью, которая зависит от материалов решетки и основы, конструкции решетки и выводов тензорезисторов. Для низко- и средне - частотных процессов используют проволочные и фольговые тензорезисторы. Динамические нагрузки больших амплитуд измеряют проволочными тензорезисторами. Наибольшей динамической стойкостью обладают тензорезисторы на фенольной, фуриловой и пластифицированной эпоксидной пленочной основах. Охарактеризованные первичные преобразователи являются составной частью сложных измерительных систем.

2.5. Измерения радиационного излучения. Средства измерения радиационного излучения

По виду регистрируемого излучения различают дозиметрические приборы: для мягкого рентгеновского излучения, для рентгеновского и гамма излучения, для бета и излучений, для других тяжелых заряженных частиц и для нейтронов [4]. По способу регистрации излучения в соответствии с физическими методами дозиметрии различают приборы: ионизационные, люминесцентные (сцинтилляционные), полупроводниковые, фото дозиметрические, химические и калориметрические. Наиболее широкое применение получили ионизационные и люминесцентные дозиметрические приборы. В зависимости от измеряемых параметров различают дозиметрические приборы, предназначенные для измерения дозы или мощности дозы излучения-рентгенометры (дозиметры), и приборы, измеряющие активность или плотность потока ионизирующих излучений, позволяющие вести счет отдельным частицам (квантам) и называемые радиометрами. По измеряемой физической величине и типу регистрирующего устройства бывают приборы, показывающие результат, и интегрирующие, которые суммируют результат измерения за определенный промежуток времени. Для анализа энергетического спектра излучения, выделения определенной компоненты в излучении сложного состава и ряда других целей пользуются вспомогательными радиотехническими приборами (пересчетные устройства с запоминающими схемами, амплитудные дискриминаторы и анализаторы).

Таблица 2.14

Виды ионизирующих излучений

Термин	Определение
1 Фотонное ионизирующее излучение	Электромагнитное косвенное ионизирующее излучение.
2 Гамма- излучение	Фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц.
3 Тормозное излучение	Фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц.
4 Характеристическое излучение	Фотонное излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома.
5 Рентгеновское излучение	Фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучений.
6 Корпускулярное излучение	Ионизирующее излучение, состоящее из частиц с массой, отличной от нуля. Примечание. Нейтринное излучение также относится к корпускулярному излучению.
7 Альфа-излучение	Корпускулярное излучение, состоящее из частиц, испускаемых при ядерных превращениях.
8 Электронное излучение	Корпускулярное излучение, состоящее из электронов и (или) позитронов.
9 Бета-излучение	Электронное излучение, возникающее при бета-распаде ядер или нестабильных частиц.
10 Конверсионные электроны	Электронное излучение, возникающее при внутренней конверсии гамма-излучения.
11 Фотоэлектроны	Электронное излучение, возникающее при фотоэлектрическом взаимодействии фотонного излучения с веществом.
12 Комптоновские электроны	Электронное излучение, возникающее при комптоновском (некогерентном) рассеянии фотонного излучения.
13 Электроны	Электронное излучение, возникающее при переходе атомов из возбужденного состояния в энергетическое сопровождаемом фотонах.

Продолжение табл. 2.14

14 Протонное излучение	Корпускулярное излучение, состоящее из ядер ^1H .
15 Нейтронное излучение	Корпускулярное излучение, состоящее из нейтронов. Примечания: 1 Нейтроны, испускаемые при делении атомных ядер, называются нейтронами деления. 2 Нейтроны, испускаемые при взаимодействии фотонного излучения с атомными ядрами, называются фотонейтронами.
16 Холодные нейтроны	Нейтронное излучение со средней энергией нейтронов, меньшей средней энергии атомов окружающей среды.
17 Тепловые нейтроны	Нейтронное излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с рассеивающими атомами среды.
18 Промежуточные нейтроны	Нейтронное излучение с энергией нейтронов в интервале от средней энергии тепловых нейтронов до 200кэВ.
19 Быстрые нейтроны	Нейтронное излучение с энергией нейтронов в интервале от 200кэВ до 20МэВ.
20 Сверхбыстрые нейтроны	Нейтронное излучение с энергией нейтронов больше 20МэВ.
21 Мезонное излучение	Корпускулярное излучение, состоящее из мезонов.
22 Нейтринное излучение	Корпускулярное излучение, состоящее из нейтрино.
23 Космическое излучение	Ионизирующее излучение, состоящее из первичного ионизирующего излучения, пропускающего из космического пространства, и вторичного ионизирующего излучения, возникающего в результате взаимодействия первичного ионизирующего излучения со средой.
24 Моноэнергетическое ионизирующее излучение	Ионизирующее излучение, состоящее из фотонов одинаковой энергии или частиц одного вида с одинаковой кинетической энергией.

25 Немонорезергетическое ионизирующее излучение	Ионизирующее излучение, состоящее из фотонов, различной энергии или частиц одного вида с разной кинетической энергией.
26 Смешанное ионизирующее излучение	Ионизирующее излучение, состоящее из частиц различного вида или из частиц и фотонов.
27 Направленное ионизирующее излучение	Ионизирующее излучение с выделенным направлением распространения.
28 Диффузное ионизирующее излучение	Ионизирующее излучение, не имеющее преимущественного направления распространения.
29 Поляризованное ионизирующее излучение	Ионизирующее излучение, состоящее из частиц с определенной ориентацией спинов и (или) фотонов с определенной ориентацией электрического вектора.
30 Естественный фон ионизирующего излучения	Ионизирующее излучение, состоящее из космического излучения и ионизирующего излучения естественно распределенных природных радиоактивных веществ.
31 Фон ионизирующего излучения	Ионизирующее излучение, состоящее из естественного фона и ионизирующих излучений посторонних источников.

Ионизационные приборы основаны на использовании явления взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, при котором часть энергии излучения передается атомам этого вещества и расходуется на их ионизацию. Под действием радиоактивных излучений воздух между обкладками конденсатора ионизируется, и его молекулы и атомы из электрически нейтральных превращаются в ионы, несущие положительные и отрицательные заряды. Наличие разности потенциалов, приложенной к обкладкам, приводит к тому, что ионы разных знаков, двигаясь в противоположные направления, вызовут ток в цепи, пропорциональный интенсивности излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным требованием, предъявляемым к современной радиоэлектронной аппаратуре, является пригодность использования ее по назначению в заданных условиях. Совокупность свойств, определяющих степень пригодности, характеризуется качеством. Составной частью качества является надежность, в понятие которой включается некоторая часть свойств, определяющих качество.

Анализ технологических процессов испытаний и практика их проведения позволяют выделить характерные для всех видов испытания этапы, а именно: подготовку объекта и оборудования к испытаниям и собственно испытания. К последним относится управление процессом испытаний; измерение физических параметров объекта испытаний и внешних воздействий; обработка результатов измерений; анализ состояния объекта испытаний; выработка рекомендаций по корректировке проектных решений; регулировка; диагностирование и поиск неисправностей объекта испытаний; регистрация результатов или документирование технологического процесса испытаний.

Все перечисленные этапы состоят из сложных и трудоемких информационно-измерительных и управляющих процессов. Успешная их реализация невозможна без знания и правильного использования средств испытательного оборудования.

Учебное пособие написано по программе курса «Методы и средства испытаний и контроля приборов и систем» читаемого в ВГТУ по направлению 12.03.01 «Приборостроение» (профиль «Приборостроение») и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» (профиль «Проектирование и конструирование электронных средств»). Материал пособия излагается на основе действующих государственных и отраслевых стандартов.

ГЛОССАРИЙ

1. Контроль - процесс установления соответствия между состоянием объекта и заданной нормой путем восприятия и оценки информации.

2. Испытания - процесс определения параметров РЭА по установленной методике с целью оценки их соответствия требованиям.

3. Виды контроля:

- по способу контроля;
- по отношению к производственному процессу;
- по способу определения степени пригодности изделия к использованию;
- по степени охвата;
- по характеру воздействия контроля на производственный процесс;
- по периодичности контроля;
- по степени участия человека в контроле.

4. Основные функции ОТК: контроль процесса производства и его подготовка.

5. Операции контроля в процессе производства:

- выходной контроль;
- контроль за соблюдением технологического процесса;
- анализ брака и дефектов;
- техническая приемка и испытания изделий.

6. Способы контроля:

- визуальный;
- геометрический;
- механический;
- электрический;
- физико-химический;
- технологический;

7. Факторы, учитываемые при выборе средств контроля:

- цели контроля;
- виды производства;
- назначение контролируемого устройства и степень его сложности;
- требуемая надежность РЭА;
- место проведения контроля;
- допустимая длительность действия средств контроля;
- допустимая погрешность и поля допуска параметров;
- условия эксплуатации средств контроля;
- квалификация контролеров и безотказность их работы.

8. Разброс параметров - разность между медианой и значением измеряемого параметра выборки.

9. Цель испытаний - определение работоспособности РЭА при воздействии внешних факторов.

10. Виды испытаний на влагуостойчивость: при длительном и кратковременном воздействии повышенной влажности.

11. В зависимости от условий эксплуатации изделия подвергаются циклическим или непрерывным испытаниям с выпадением росы или без этого.

12. Способы создания условий для выпадения росы:
- ежесуточное включение источников нагрева и влаги на определенное время (6-8 часов);
 - периодическое (суточное) понижение температуры на 5-10 градусов.

13. При длительных испытаниях на влагуостойчивость время выдержки составляет 24 часа, при кратковременных - 1-2 часа.

14. Проблемы при испытаниях на влагуостойчивость, с которыми сталкиваются специалисты:

- интенсивность отказов очень велика;
- результаты испытаний имеют переменный характер и не поддаются прогнозированию;
- попытки корреляции результатов, полученных в естественных условиях, с результатами испытаний в различных других условиях, не имеют успеха.

15. Степень гигроскопичности материала - основные параметры, характеризующие влажность.

16. Активная сорбция - явление, когда влага проникает в структуру вещества по межмолекулярным каналам.

17. Неактивная сорбция – молекулы воды поглощаются поверхностью через капилляры и поры.

18. Способы защиты ЭА от действия влажного воздуха бывают активными и пассивными.

19. Пассивная защита ЭА от действия влажного воздуха – создание барьера, либо полностью изолирующего ее от влажного воздуха, либо замедляющего проникновение влаги к защищаемому узлу.

20. Все методы испытаний делят на две большие группы:

- Физические испытания реальных ЭА или ее макетов;

- Испытания, осуществляемые моделированием.

21. Лабораторные испытания проводят 3 способами:

- последовательным;

- параллельным;

- комбинированным.

22. Испытания на этапе производства подразделяют на:

- приемо-сдаточные;

- периодические;

- проверочные.

23. Методика испытаний – основной документ, определяющий последовательность работ при испытаниях.

24. Цель климатических испытаний – проверка работоспособности ЭА при внешних климатических воздействиях.

25. Термостойкость – способность конструкции из полимера сохранять свои геометрические размеры.

26. Эжекторные насосы – насосы, служащие для создания разрежения за счет захвата молекул струей газа или пара.

27. Паромасляные насосы – насосы, осуществляющие захват и удержание молекул воздуха парами масла.

28. Гетерные насосы (сорбционные). При сорбционной откачке используются эффекты физической и химической адсорбции, а также химической реакции на поверхности.

29. Криогенные насосы – насосы, в которых работа основана на конденсации паров и перевода жидкой фазы в твердую.

30. Давлением жидкости или газа называют силу, действующую на площадь; за единицу давления принимают единицу силы, действующей равномерно на единицу площади.

31. При измерении различают: атмосферное, избыточное, вакуумметрическое и абсолютное давления.

32. Атмосферное (барометрическое) давление – давление, создаваемое массой воздушного столба земной атмосферы.

33. Избыточное давление – давление, выражающее превышение давления среды над атмосферным давлением.

34. Вакуумметрическое давление – давление среды, характеризующее давление (вакуум), недостающее до атмосферного.

35. Жидкостные манометры – приборы, в которых величиной, характеризующей измеряемое давление, служит высота столба уравнивающей жидкости в стеклянной измерительной трубке. В качестве уравнивающей

жидкости используются ртуть, дистиллированная вода, этиловый спирт.

36. Деформационные манометры – приборы, принцип действия которых основан на использовании деформации упругого чувствительного элемента, возникающей под влиянием измеряемого давления.

37. Ионизационные вакуумметры с накаливаемым катодом – вакуумметры, работа которых основана на ионизации молекул остаточных газов, летящих от катода, а мерой давления является ионный ток, измеренный при постоянной эмиссии катода.

38. Течеискатели – приборы, в которых натекание характеризуется потоком газа Q и определяется по изменению давления ΔP в замкнутой системе объемом V за промежутки времени Δt : $Q = (\Delta P V / \Delta t) /$

39. Основные методы определения течей: массоспектрометрический, галоидный, манометрический, газоаналитический, метод палладиевого барьера, искровой.

40. Вибрационные нагрузки – нагрузки, которым подвергается ЭА вследствие различных механических воздействий, которые могут возникать при транспортировке, при работе различных механизмов, в случае установки РЭА на самолеты, корабли, автомобили и т.д.

41. Уменьшение вибрации можно достигнуть:

- путем установки между вибрирующим объектом и его основанием упругих прокладок;
- применением различного типа амортизаторов;
- изготовлением ряда деталей из пластмассы.

42. Ударные нагрузки – нагрузки, связанные с резким и быстрым изменением ускорения, скорости или направления перемещения объекта, на котором установлена аппаратура.

43. Воздействие звукового давления на РЭА – воздействие связанное, с выделением энергии колебаний звуковой частоты среды и приводящие к изменению давления по сравнению с атмосферным (статическим) давлением.

44. Звуковое давление – разность между статическим давлением и давлением в данной точке звукового поля.

45. Порог слышимости – минимально допустимое эффективное звуковое давление, при котором имеет место слуховое восприятие. Стандартному порогу слышимости соответствует эффективное звуковое давление $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м² при гармоническом звуковом колебании с частотой 1000 Гц.

46. Болевой порог слышимости – звуковое давление, при котором возникает болевое ощущение; он соответствует эффективному звуковому давлению 20 Н/м² при частоте 1000 Гц.

47. Основная цель вибрационных испытаний – установление способности изделия противостоять влиянию механических воздействий, а также определение их способности выполнять свои функции при сохранении электрических параметров в пределах установленных норм.

48. Два основных метода проведения испытаний на воздействие одночастотного синусоидального колебания:

- метод фиксированных частот;
- метод качающейся частоты

49. Испытания на воздействие одиночных ударов могут производиться с помощью трех основных типов оборудования:

- устройств с вертикальным сбрасыванием по направляющим;

- устройств со свободным падением; устройств маятникового типа.

50. Испытания на пылезащищенность – это выявление способности изделия не допускать попадания пыли внутрь корпуса.

51. Испытания на пылеустойчивость – испытания изделия на образования действия пыли (разрушающее действие).

52. При испытании на пылеустойчивость применяется следующий состав: просушенная пылевая смесь, содержащая 60-70% песка, 15-20% мела и 15-20% каолина.

53. При испытании на пылезащищенность – формирующий порошок (сульфид цинка) 10%, песок 60%, мел 15%, каолин 15%.

54. Основные параметры при испытании на пылеустойчивость:

- величина частиц смеси не более 50 мкм;
- скорость циркуляции воздушно-пылевого потока 0,5-1м/сек;
- продолжительность обдува 2 час.

55. Основные параметры при испытании на пылезащищенность:

- величина частиц смеси не более 20 мкм;
- скорость циркуляции воздушно-пылевого потока 10-15м/сек;
- продолжительность обдува 1 час.

56. Камеры КП – камеры, которые используют для проведения испытаний на воздействие пыли.

57. Целью испытаний на грибоустойчивость является определение устойчивости параметров и способности изделий противостоять развитию и разрушаемому действию плесневых грибов, которыми заражена окружающая влажная среда.

58. Оптимальными условиями развития плесени являются высокая относительная влажность (более 85%), неподвижность воздуха и температура от 20 до 30 °С.

59. Особенно подвержены воздействию плесени: масляные краски, детали из древесины, стеклянные призмы и линзы.

60. В тропических условиях достаточно устойчивы к действию плесени такие пластмассы, как полиэтилен, полихлорвинил, фторопласт и др.

61. Система, которая используется для оценки роста грибов, называется пятибалльной системой, рекомендованной Международной электротехнической комиссией (МЭК).

62. Испытания на воздействие морского тумана – это иакме испытания, которые позволяют выявить коррозионную устойчивость различных изделий, состояние их поверхностных покрытий и т.д.

63. Водородный показатель рН – это число, характеризующее степень кислотности или щелочности раствора, т.е. концентрацию водородных и гидроксильных ионов в нем.

64. Камера соляного тумана (КСТ) – это испытательное оборудование, которое должно обеспечивать возможность поддерживать температуры от 25 до 60 °С при относительной влажности до 100% и быть коррозионно-стойким.

65. Дисперсность – величина, характеризующая степень раздробления вещества на частицы.

66. Водность – величина, характеризующая количество капель жидкой влаги в единице объема.

67. Целью испытания на брызгозащищенность, водозащищенность и водонепроницаемость является выявление устойчивости работы изделий во время и после пребывания под указанными видами воздействий.

68. α -лучи – это потоки противоположно заряженных частиц, причем α -лучи являются потоком положительно заряженных частиц, а β -лучи – отрицательно заряженных частиц, γ -лучи являются нейтральными.

69. Ионизирующее излучение – это радиационное излучение, проникающее в толщу вещества и вызывающее в нем ионизацию.

70. Целью радиационного испытания является определение устойчивости изделий к воздействию радиации, а также проверка их способности выполнять свои функции и сохранять неизменными параметры в процессе и после пребывания в среде с повышенной радиоактивностью.

71. γ -кванты и нейтроны высокой энергии (1 МэВ) – вид излучения, возникающий при ядерном взрыве и

вызывающий переходные или необратимые изменения характеристик элементов и выводящие ЭА из строя.

72. Рентгенометры (дозиметры) – приборы, измеряющие дозу или мощность дозы излучения.

73. Радиометры – приборы, которые определяют плотность потока ионизирующего излучения и позволяют вести счет отдельным частицам (квантам).

74. Целью космических испытаний является установление работоспособности ЭА сохранять свои параметры в пределах норм при воздействии целой группы внешних факторов: 1 – невесомость; 2 – низкое давление; 3 – переменная температура; 4 – вибрация; 5 – линейное ускорение; 6 – радиация.

75. Автоматизированные системы испытания и контроля (АСИК) – программно-аппаратный комплекс на базе средств испытательной, измерительной и вычислительной техники, предназначенной для выполнения комплексного контроля изделий РЭА

76. Технические условия – основной документ, в соответствии с которым проводят приемку оборудования.

77. Приемно-сдаточные испытания – проверка соответствия оборудования требованиям, указанным в технических условиях для данного вида испытаний, и определение возможности приемки оборудования.

78. Периодические испытания – контроль соответствия оборудования требованиям технических условий и возможности продолжения его выпуска.

79. Квалификационные испытания – определение готовности производства к выпуску оборудования в заданном объеме и проверке соответствия оборудования требованиям.

80. Типовые испытания – оценка эффективности и целесообразности изменений, вносимых в конструкцию или технологический процесс изготовления оборудования.

81. Испытания на надежность – проверка соответствия показателей надежности оборудования требованиям технических условий.

82. Естественные воздействия – совокупность климатических, биологических, космических и механических воздействий.

83. Внутренние воздействия – определяются режимом работы РЭА и характеризуются нагрузками, например электрическими и механическими, связанными с функционированием РЭА.

84. Объективные факторы – воздействия внешних условий, в которых осуществляется хранение, транспортировка и эксплуатация ЭА.

85. Субъективные факторы – человеческая деятельность на этапах проектирования, производства и эксплуатации РЭА

86. Надежность – свойство объекта сохранять способность выполнять заданные функции, включающие в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации такие свойства как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или их сочетания.

87. Показатель надежности – техническая характеристика, количественным образом определяющая одно или несколько свойств, составляющих надежность объекта.

88. Единичный показатель надежности – одно из свойств (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость), составляющих надежность изделия.

89. Вероятность безотказной работы – вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа.

90. Вероятность отказа – вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникает хотя бы один отказ.

91. Частота отказов – отношение числа отказавших изделий в единицу времени к первоначальному числу испытываемых изделий при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются.

92. Интенсивность отказов – отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

93. Закон Пуассона – описывает случайные события, появляющиеся на интервале времени t с большой частотой, но в каждом случае с малой вероятностью

94. Биноминальный закона распределения – позволяет оценить вероятность появления некоторого события A равно p раз в серии из m опытов.

95. Экспоненциальный закон распределения – частный случай более общего закона распределения Вейбулла.

96. Распределение Вейбулла – используют для оценки надежности РЭА на этапах приработки и старения.

97. Усеченный нормальный закон распределения – используется для оценки показателей надежности на этапе износа и старения и, в некоторых случаях, для определения времени наработки.

98. Логарифмический нормальный закон распределения – применяется в том случае, когда логарифм случайной величины t имеет нормальное распределение.

99. Управляющая функция АСИК – совокупность действий, включающих получение информации о состоянии испытываемого объекта и системы, оценку информации, выбор управляющих воздействий и их реализацию.

100. Информационная функция – получение (измерение и преобразование), обработка и передача информации о состоянии испытываемого объекта, оборудования - внешней и внутренней среды испытательной камеры.

101. Вспомогательная функция – сбор и обработка данных о состоянии технического или программного обеспечения и либо представления этой информации персоналу, либо осуществление управляющих воздействий на соответствующие компоненты обеспечения АСИК.

102. Объект регулирования – любая из испытываемых установок, в которой требуется поддерживать испытательный режим.

103. Модуль – аналог ввода, а также дополнительное устройство управления периферийными терминалами, необходимое для отладки встраиваемых процессов.

104. Гигроскопичность – способность материалов поглощать влагу из воздуха.

105. Водостойкость – процент воды, который впитывает единица сухого материала при пребывании в воде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малинский, В. Д. Контроль и испытания радиоаппаратуры / В. Д. Малинский. – М.: Энергия, 1970. – 336 с.
2. Коробова, А. И. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: учеб. пособие для вузов; под ред. А. И. Коробова. – М.: Радио и связь, 1987. – 272 с.
3. Клюева, В. В. Испытательная техника/ под ред. В. В. Клюева.– М.: Машиностроение, 1982. Кн. 1.– 528 с.
4. Кузнецов, А. А. Вибрационные испытания элементов и устройств автоматики / А. А. Кузнецов. – М.: Энергия, 1976. – 118 с.
5. Глудкин, О. П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС / О. П. Глудкин – М.: Высш. шк., 1991. – 336 с.
6. Серёгин, М. Ю. Организация и технология испытаний: в 2 частях, ч.1: учеб. пособие / М. Ю. Серёгин – Тамбов: ТЕТН, 2006. - 84 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ ПРИБОРОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.....	5
1.1. Классификация приборов и систем.....	5
1.2. Надежность приборов и систем.....	11
1.3. Факторы, определяющие надежность приборов и систем.....	16
1.4. Классификация методов испытаний приборов и систем.....	18
1.5. Ускоренные испытания.....	22
1.6. Испытания на повреждающую нагрузку.....	32
1.7. Статистические испытания.....	36
1.8. Граничные испытания.....	41
1.9. Матричные испытания.....	47
1.10. Испытания приборов и систем в процессах проектирования и производства.....	51
1.11. Методика составления программы испытаний.....	55
1.12. Определение продолжительности испытаний и количества испытываемых изделий.....	62
1.13. Основные сведения о климатических механических факторах, воздействующих на приборы и системы.....	69
1.14. Общие положения об испытаниях приборов и систем.....	84
2. СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ.....	95
2.1. Средства измерения температуры.....	95
2.2. Средства измерения влажности воздуха.....	110
2.3. Вакуумные машины и установки.....	114
2.4. Силоизмерительные устройства с упругими динамометрами.....	124
2.5. Измерения радиационного излучения. Средства измерения радиационного излучения.....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	158
ГЛОССАРИЙ.....	159
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	171

Учебное издание

Никитин Леонид Николаевич
Пирогов Александр Александрович
Бобылкин Игорь Сергеевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ
ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

Учебное пособие

Компьютерная верстка Л.Н. Никитина

Подписано к изданию 27.09.2018.
Объем данных 2,1 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14