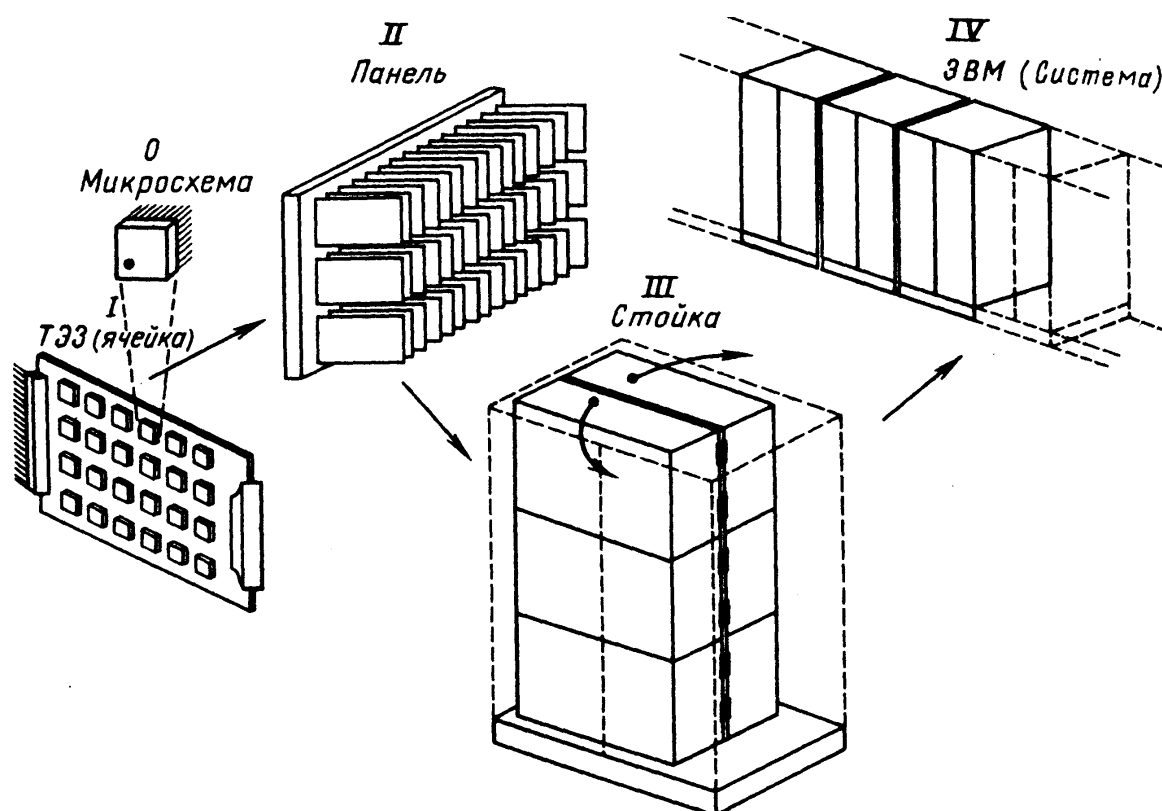


Р.Я. Лабковская

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ИСПЫТАНИЙ ЭВС ЧАСТЬ 1



Санкт-Петербург
2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Р.Я. Лабковская
Методы и устройства испытаний ЭВС
Часть 1
Учебное пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2015

Лабковская Р.Я. Методы и устройства испытаний ЭВС. Часть 1. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 164 с.

В учебном пособии охвачен круг вопросов, связанных с испытаниями ЭВС, устройствами испытаний, инженерными и статистическими расчетами.

Предназначено для обучения студентов в рамках общепрофессиональных дисциплин ОПД.Ф.05 «Метрология, стандартизация и сертификация», ОПД.Ф.05.01 «Метрология, стандартизация и технические измерения» и ОПД.Ф.06 «Метрология и электрорадиоизмерения» учебного плана подготовки бакалавров по направлениям 211000 – «Конструирование и технология электронных средств», 11.03.03. – «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств».

Рекомендовано к печати по решению совета факультета КТиУ Университета ИТМО от 23.06.2015 (протокол № 6)



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2015

©Лабковская Р.Я., 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1	9
ФАКТОРЫ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА. ПРОБЛЕМЫ ИСПЫТАНИЙ	9
1.1. Классификация воздействий и воздействующих факторов	9
1.2. Климатические воздействия	13
1.3. Биологические воздействия	20
1.4. Космические воздействия	24
1.5. Механические воздействия	33
1.6. Проблемы проведения испытаний ЭС	43
Глава 2	55
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ	55
2.1. Некоторые понятия теории вероятностей, применяемые при испытаниях ЭС	55
2.2. Выборочный метод испытаний. Основные характеристики	62
2.3. Классификация испытаний	65
2.4. Проведение лабораторных и стендовых испытаний	80
2.5. Программа испытаний ЭС.....	85
2.6. Методика испытаний	93
2.7. Классификация и анализ отказов ЭС	97
Глава 3	104
ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ	104
3.1. Общие сведения	104
3.2. Виды вибраций	105
3.3. Обнаружение резонансных частот	110
3.4. Испытания на виброустойчивость и вибропрочность	113

3.5. Воздействие ударной нагрузки.....	134
3.6. Воздействие линейной нагрузки	149
3.7. Воздействие акустического шума	153
ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ.....	160
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	163

ВВЕДЕНИЕ

Контроль как средство повышения качества электронных средств. Под качеством электронных средств (ЭС) понимают совокупность свойств, определяющих способность изделий удовлетворять заданным требованиям потребителя. Качество ЭС обуславливает их конструктивные, технологические, экономические, эргономические и другие параметры. Качество как свойство закладывается в процессе разработки и изготовления ЭС, а объективно оценивается в процессе эксплуатации. Однако получаемая при этом информация является, во-первых, недостаточной, поскольку не все параметры ЭС, необходимые для оценки качества, измеряются в условиях эксплуатации, а во-вторых, – запоздалой, так как на изготовление ЭС уже затрачены большие средства. Эта проблема усугубляется по мере дальнейшей микроминиатюризации ЭС, когда целые блоки выполняются в виде интегральных схем (ИС), которые являются неремонтопригодными.

Одним из источников оценки качества служат теоретические расчеты. Однако расчетные оценки нуждаются в экспериментальном подтверждении, поскольку исходные данные и модели являются приближенными. С развитием микроминиатюризации и усложнением ЭС создание адекватных моделей становится проблематичным. В этой связи существенный объем информации о качестве ЭС получают путем контроля их параметров и проведения испытаний на всех этапах, начиная с разработки нормативно-технической документации (НТД) и кончая анализом рекламаций и заключений потребителя о качестве готовых изделий.

На рисунке 1.1 представлена последовательность процесса разработки, производства и эксплуатации ЭС, которая в общем виде показывает место и значимость контрольных и испытательных операций в производстве изделий. Как видно из рисунка 1.1, контроль качества ЭС может осуществляться на этапах:

- разработки (всестороннее исследование всех свойств ЭС, определяющих качество изделий);
- выполнения технологических операций при изготовлении ЭС, включая входной контроль параметров электрорадиоэлементов;
- испытания готовых ЭС (аттестация изделий на соответствие требуемому качеству);
- эксплуатации (проверка соответствия качества ЭС требованиям НТД). Вопрос о проведении анализа и контроля на том или ином этапе «жизненного» цикла ЭС (проектирование, постановка на производство, изготовление, эксплуатация, ремонт, поставка на экспорт, импортные закупки и др.) решается в каждом конкретном

случае в зависимости от требований, предъявляемых к ЭС, и возможностей осуществления контроля параметров. Как показывает практика, наибольшее число отказов ЭС происходит в период освоения изделий в опытном производстве. В серийном производстве и в процессе эксплуатации число отказов резко уменьшается. Поэтому особое значение приобретает информация, получаемая в результате контроля и испытаний ЭС на различных этапах разработки и изготовления по вертикали – от элементов до функционально и конструктивно более сложных ЭС.

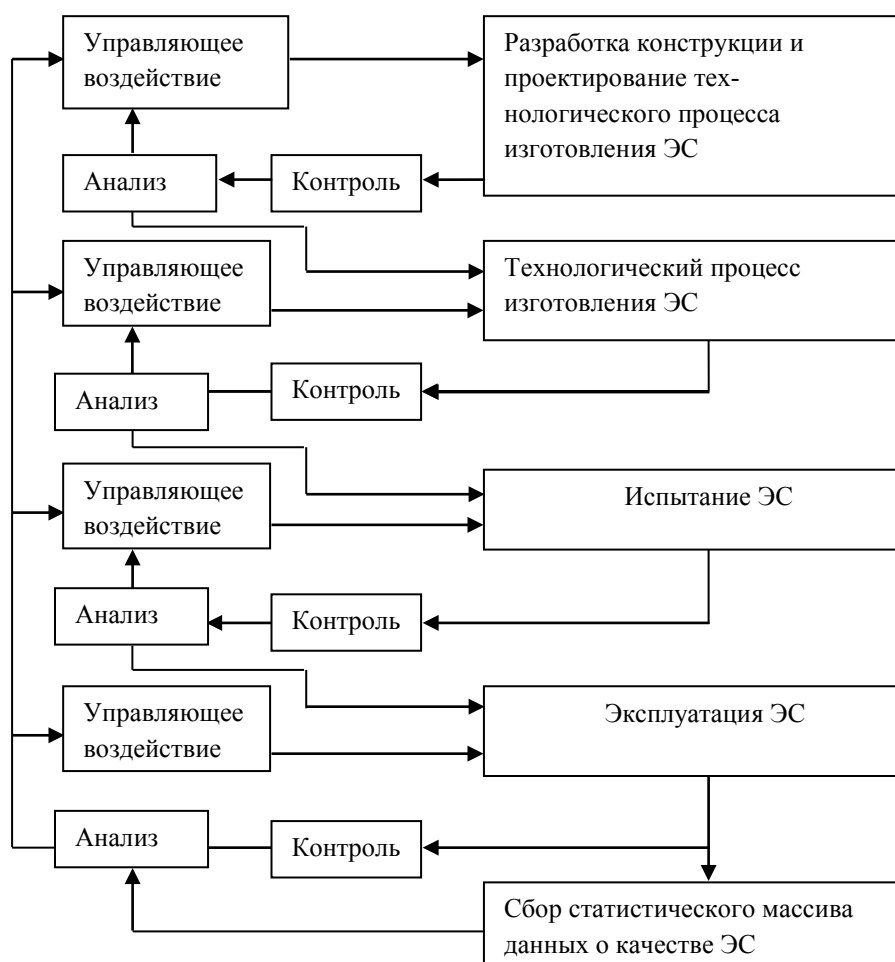


Рисунок 1.1 – Последовательность процессов разработки производства и эксплуатации ЭС

При изготовлении ЭС различают контроль готовых изделий или полуфабрикатов и контроль технологического процесса (ТП) их изготовления. Контроль изделий или полуфабрикатов – это совокупность операций, направленных на выявление дефектных изделий или полуфабрикатов в процессе их производства. Под контролем ТП, как

правило, понимают операционный контроль изделия или процесса во время выполнения или после завершения технологической операции.

Испытания как основная форма контроля ЭС представляют собой экспериментальное определение при различных воздействиях количественных и качественных характеристик изделий при их функционировании. При этом как сами испытываемые изделия, так и воздействия могут быть смоделированы. Цели испытаний различны на различных этапах проектирования и изготовления ЭС. К основным целям испытания, общим для всех ЭС, можно отнести:

- выбор оптимальных конструктивно-технологических решений при создании новых изделий;
- доводку изделий до необходимого уровня качества;
- объективную оценку качества изделий при их постановке на производство, в процессе производства и при техническом обслуживании; гарантирование качества изделий при международном товарообмене.

Испытания служат эффективным средством повышения качества, так как позволяют выявить:

- недостатки конструкции и технологии изготовления ЭС, приводящие к срыву выполнения заданных функций в условиях эксплуатации;
- отклонения от выбранной конструкции или принятой технологии, допущенные в производстве;
- скрытые случайные дефекты материалов и элементов конструкции, не поддающиеся обнаружению существующими методами технического контроля;
- резервы повышения качества и надежности разрабатываемого конструктивно-технологического варианта изделия. По результатам испытаний изделий в производстве разработчик ЭС устанавливает причины снижения качества. Если эти причины установить не удастся, совершенствуют методы и средства контроля изделий и ТП их изготовления.

Для повышения качества выпускаемых ЭС на конечных операциях ТП их изготовления проводят предварительные испытания, позволяющие выявить изделия со скрытыми дефектами. Режимы этих испытаний выбирают такими, чтобы они обеспечивали отказы изделий, содержащих скрытые дефекты, и в то же время не вырабатывали ресурса тех изделий, которые не содержат дефектов, вызывающих при эксплуатации отказы. Такие предварительные испытания часто называют технологическими тренировками (термотоковая тренировка, электротренировка, тренировка термоциклами и др.).

Программа и методы проведения испытаний определяются конкретными видом и назначением ЭС, а также условиями эксплуатации.

При испытаниях и оценке их результатов, предприятия, организации и отдельные должностные лица выступают как изготовители, испытатели, потребители ЭС. Нормальное взаимодействие между ними возможно только в том случае, если разработаны: единый технический язык (терминология, классификация методов и устройств испытаний); форма и содержание специальных технических документов (стандартов, методик, программ, графиков, заключений, протоколов и т.п.); общие требования к методам и устройствам для испытаний в зависимости от видов испытаний и ЭС; порядок проведения испытаний, определяемый соответствующей стадией «жизненного» цикла ЭС; положения о правах и обязанностях предприятий, подразделений и отдельных должностных лиц при проведении испытаний.

Все перечисленные организационные требования являются объектами стандартизации. Стандарты и методики, распространяющиеся на них, образуют группу основополагающих организационных нормативно-методических документов. Эти документы разрабатывают прежде всего на общегосударственном межотраслевом уровне, а затем уже развивают и дополняют на уровне отраслей и в случае необходимости – на уровне отдельных предприятий. При существующей типовой организации и технологии проведения испытаний стандартизации подлежат:

- требования к испытаниям продукции;
- процесс организации испытаний;
- методы и устройства испытаний;
- планирование испытаний, что оговаривается в частных и общих технических условиях (ЧТУ и ОТУ) на электронные средства.

Стандарты технических условий – основной документ, по которому осуществляют контроль качества выпускаемых ЭС. На основании этого документа по результатам испытаний принимают решение о пригодности ЭС к поставке и последующему их использованию, а также решают все спорные вопросы между изготовителем и потребителем изделий.

Следует отметить, что повышение эффективности контроля процесса проектирования и ТП изготовления изделий приводит к снижению роли испытаний готовой продукции. Хорошо организованный автоматизированный контроль ТП производства ЭС позволяет сократить объем испытаний готовых изделий. Учитывая необходимость оптимизации стоимости ЭС, следует находить разумный компромисс между объемом испытаний и эффективностью контроля ТП изготовления изделий.

Глава 1

ФАКТОРЫ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА. ПРОБЛЕМЫ ИСПЫТАНИЙ

1.1. Классификация воздействий и воздействующих факторов

Современные ЭС, сконструированные на базе ИС и полупроводниковых приборов, с физико-технологической точки зрения представляют собой сложные структуры, состоящие из полупроводниковых, диэлектрических, металлических и резистивных слоев или пленок, в которых происходят процессы переноса вещества (диффузия, электродиффузия), химического взаимодействия различных материалов между собой и с окружающей средой (реакции окисления, замещения, восстановления и др.), изменения кристаллической структуры (кристаллизация, рекристаллизация). При этом в деталях конструкций ЭС протекают процессы теплообмена, образования магнитных и электрических полей, возникновения упругих и пластических деформаций и т. п., носящие как обратимый, так и необратимый характер.

Процессы являются обратимыми, если после снятия влияющих на изделие воздействий его параметры принимают первоначальные значения. Если же параметры изделия не принимают первоначальных значений после снятия воздействий, то это означает, что в его физической структуре произошли необратимые процессы. В реальных условиях в ЭС происходят как обратимые, так и необратимые процессы. Принципиальные и функциональные схемы, конструкция и технология изготовления ЭС должны обеспечивать такое протекание процессов, при котором изменение параметров изделий в определенных условиях в течение требуемого времени эксплуатации не приводило бы ни к временной, ни к полной потере их работоспособности. При этом следует иметь в виду, что потеря работоспособности ЭС может наступить как результат неустойчивости¹ либо деградации² параметров изделий из-за старения материалов и износа отдельных деталей конструкции. Под старением понимают естественный процесс необратимого изменения свойств материалов в процессе хранения, перевозки и эксплуатации изделий. Износ - это особый вид разрушения

¹ Неустойчивость параметров – их обратимое изменение, т.е. после прекращения воздействия параметры принимают исходные или близкие им значения.

² Деградация параметров – их необратимое изменение, т.е. после прекращения воздействия значения параметров отличаются от исходных.

элементов ЭС вследствие их механического трения друг о друга или действия электрического тока.

Изменения, происходящие в физической структуре элементов и деталях конструкций ЭС, зависят от воздействий. Природа этих воздействий различна, поскольку различны условия эксплуатации ЭС. В соответствии с условиями эксплуатации выделяют наземные, корабельные и самолетные, к которым относят и космические ЭС. Стабильность (бесперебойность) функционирования ЭС связана с их устойчивостью к различным воздействиям.

Классификация воздействий. Все воздействия на ЭС можно разделить на внешние и внутренние (рисунок 1.2).

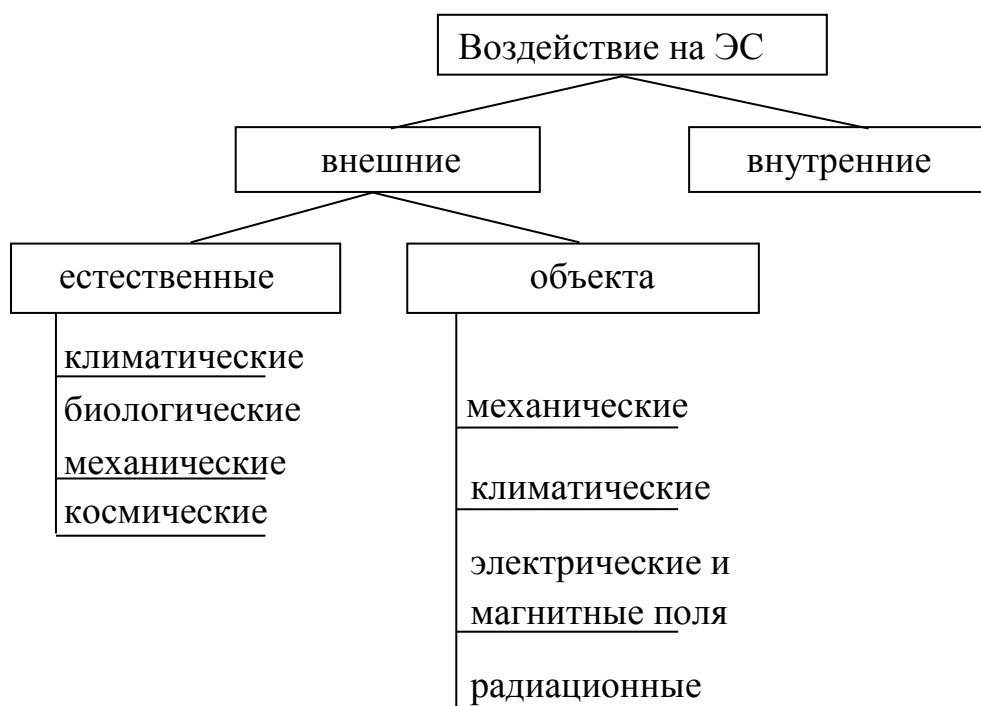


Рисунок 1.2 – Классификация воздействия на ЭС

Внешние воздействия не связаны с режимом эксплуатации ЭС и определяются условиями хранения, транспортировки и эксплуатации изделий. Внешние воздействия подразделяют на естественные воздействия и воздействия объекта, в составе которого находятся данные ЭС (рисунок 1.2). Под естественными воздействиями понимают совокупность климатических, биологических, космических и механических воздействий, обусловленных состоянием окружающей среды в месте нахождения объекта.

Воздействия объекта, на котором установлены ЭС, связаны с его функционированием. К таким воздействиям относятся климатические,

механические, радиационные и др.; электрические и магнитные поля. Наиболее важными из перечисленных являются механические воздействия.

Внутренние воздействия определяются режимами работы ЭС и характеризуются нагрузками, например электрическими и механическими, связанными с функционированием ЭС. Электрические нагрузки, обусловленные необходимостью формирования и преобразования электрических сигналов в цепях ЭС, вызывают тепловые, электрические и электрохимические процессы, приводящие к старению. Механические нагрузки связаны с наличием в ЭС соединений материалов с различными температурными коэффициентами линейного расширения. В процессе эксплуатации указанные компоненты подвергаются износу.

Под условиями эксплуатации ЭС понимают совокупность внешних и внутренних воздействий, оказывающих влияние на работоспособность изделий.

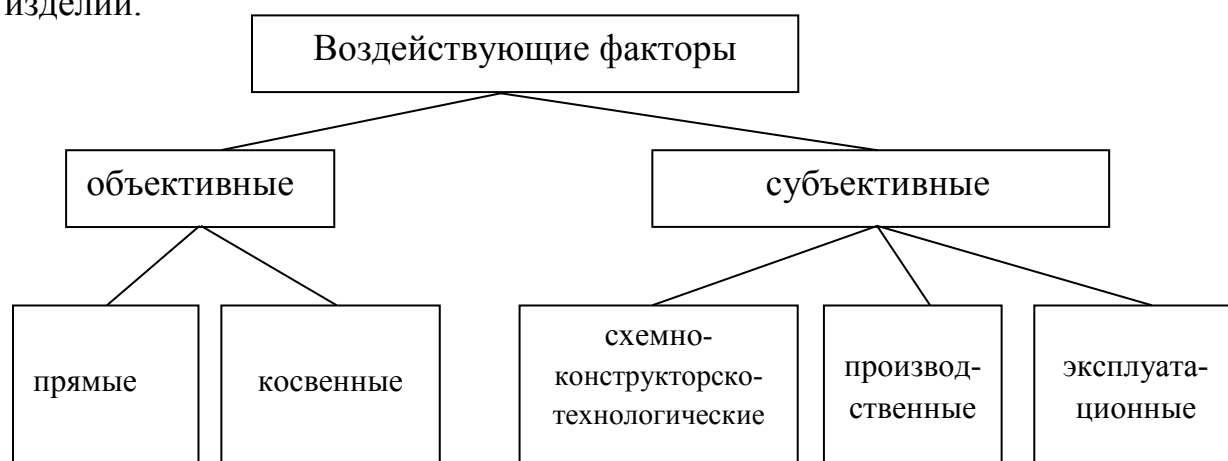


Рисунок 1.3 – Классификация воздействующих факторов

Классификация воздействующих факторов. Каждый вид воздействия характеризуется своим набором факторов. Например, для климатических воздействий это температура, влажность, давление, скорость ветра и т.д. Все воздействующие факторы по их происхождению разделяют на две группы: объективные и субъективные (рисунок 1.3). *Объективные факторы* характеризуют воздействие внешних условий, в которых осуществляют хранение, транспортировку и эксплуатацию ЭС. Различают прямые и косвенные объективные факторы. Первые характеризуют естественные воздействия, вторые – воздействия на ЭС объекта.

Например, поверхность ЭС, соприкасающаяся при быстром движении с нейтральными частицами, образующимися во время пылевых

бурь, метелей, плавания в штормовую погоду, полетов в дождь и снег, электризуется. Нейтральные частицы приобретают положительный заряд, а ЭС – отрицательный. Возникающий на поверхности заряд пропорционален кубу скорости относительного движения частиц и ЭС. При напряженности поля накопленного электрического заряда 450...600 В/см возникает «коронный» разряд в атмосферу, который приводит к искажению электрического сигнала ЭС.

Тепловые воздействия в различных условиях применения ЭС проявляются не только как постоянно действующие температуры (высокие или низкие) либо плавные их изменения, но и как перепады температур. Резкому перепаду температур подвергаются ЭС, расположенные на объектах, достаточно быстро перемещающихся по вертикали (летательные аппараты, батискафы, глубинные буры и др.). Например, за короткий промежуток времени температура ЭС, установленных на самолете вне герметизированного объема, может снижаться от +50 до -40°С (набор высоты), а затем повышаться от -40 до +100 °С (пикирование). При этом одновременно меняются влажность и давление. Интенсивность перепада косвенных факторов зависит от продолжительности набора или сброса высоты, скорости полета, расположения приборов на объекте. Так, при дозвуковых скоростях самолета скорость изменения температуры ЭС составляет 5...7°С/мин, а при сверхзвуковых – 20...30 °С/мин. Быстрое изменение температуры возможно также при включении и выключении тепловых источников на объекте или электрических нагрузок самих ЭС при движении объекта через тепловые зоны или зоны инфракрасного излучения и т. д.

Действие проникающей (ионизирующей) радиации³ (излучения) возможно при использовании ЭС на космических объектах, атомных электростанциях, а также в зонах, зараженных радиоактивными веществами. Различают корпускулярную и электромагнитную ионизирующие радиации. Корпускулярная образуется элементарными частицами – нейтронами, протонами, бета- и альфа-частицами и осколками ядер; электромагнитная – рентгеновским и гамма-излучением. Для обеспечения работоспособности ЭС в радиоактивных зонах необходимо учитывать в первую очередь поток нейтронов и гамма- излучение.

Субъективные факторы характеризуют человеческую деятельность на этапах проектирования, производства и эксплуатации ЭС. Результатом

³ Проникающей или ионизирующей радиацией называют излучение, проникающее в толщу вещества и вызывающее его ионизацию.

воздействия этих факторов являются ошибки проектирования, производства и эксплуатации, приводящие к дефектам изделий, которые при воздействии объективных факторов приводят, к частичной или полной потере работоспособности ЭС.

К ошибкам проектирования относятся недостатки электрических и функциональных схем и конструктивно-технологических решений, переоценка возможностей операторов, обслуживающих спроектированные ЭС, и недостаточно эффективная система контроля работоспособности изделий. Ошибки производства обусловлены прежде всего нарушениями ТП, применением некачественных комплектующих элементов и материалов, отсутствием достаточно жесткого контроля на отдельных стадиях производства ЭС. Ошибки эксплуатации связаны в основном с нарушениями обслуживающим персоналом эксплуатационных требований, предусмотренных соответствующими нормативными документами на ЭС. Влияние объективных и субъективных факторов на работоспособность ЭС существенно различно. Результат воздействия объективных факторов зависит от их числовых значений. Так, физико-химические процессы в структуре изделия, приводящие к отказам ЭС, протекают, как правило, при повышенных значениях объективных факторов. Из-за наличия субъективных факторов снижается устойчивость разрабатываемых изделий к воздействию объективных факторов, в результате чего уменьшаются предельно допустимые значения последних, а, следовательно, снижаются качество и надежность ЭС. Негативные последствия влияния субъективных факторов, как правило, скрыты от разработчиков и изготовителей конкретных изделий. Для их выявления на всех этапах «жизненного» цикла ЭС применяют различные виды контроля и испытаний.

1.2. Климатические воздействия

Климатические воздействия при эксплуатации ЭС подразделяют на естественные и искусственные. *Естественные климатические воздействия* определяются погодными условиями, включающими температуру, влажность, ветер, атмосферное давление и др. *Искусственные климатические воздействия* создаются вследствие функционирования ЭС и расположенных рядом объектов.

Формирование естественных климатических воздействий. При составлении технических условий на ЭС, а также программы и методики испытаний естественные климатические воздействия, обычно называемые климатом, учитывают в виде усредненных климатических факторов в тех или иных частях земной поверхности за продолжительный период времени. Формирование климата на определенной территории происходит

под влиянием радиационного процесса, циркуляции атмосферы, влагооборота, определяющих тепловой и водный баланс поверхности Земли в природной географической среде.

Радиационный процесс характеризуется распределением радиационного баланса R , учитывающего приход/расход энергии солнечной радиации. Составными частями радиационного баланса являются прямая (Q) и рассеянная (q) солнечная радиация, а также эффективное излучение (E) Земли, под которым понимают разность противоположно направленных потоков излучения земной поверхности и атмосферы. Отношение отраженной энергии солнечной радиации к падающей характеризуется числом a , называемым «альбедо» и выражаемым обычно в процентах. Очевидно, что альбедо зависит от местных физико-географических условий земной поверхности, т. е. от близости моря, направлений морских течений, горных хребтов, высоты местности и др.

Уравнение радиационного баланса:

$$R = (Q + q)(\alpha - 1)E.$$

На основании многочисленных исследований радиационных процессов в отдельных районах Земли разработаны мировые карты составляющих радиационного баланса. Установлено также, что суммарная солнечная радиация при безоблачном небе имеет сравнительно устойчивые среднемесячные суточные значения, которые определяются в основном широтой местности и временем года (рисунок 1.4).

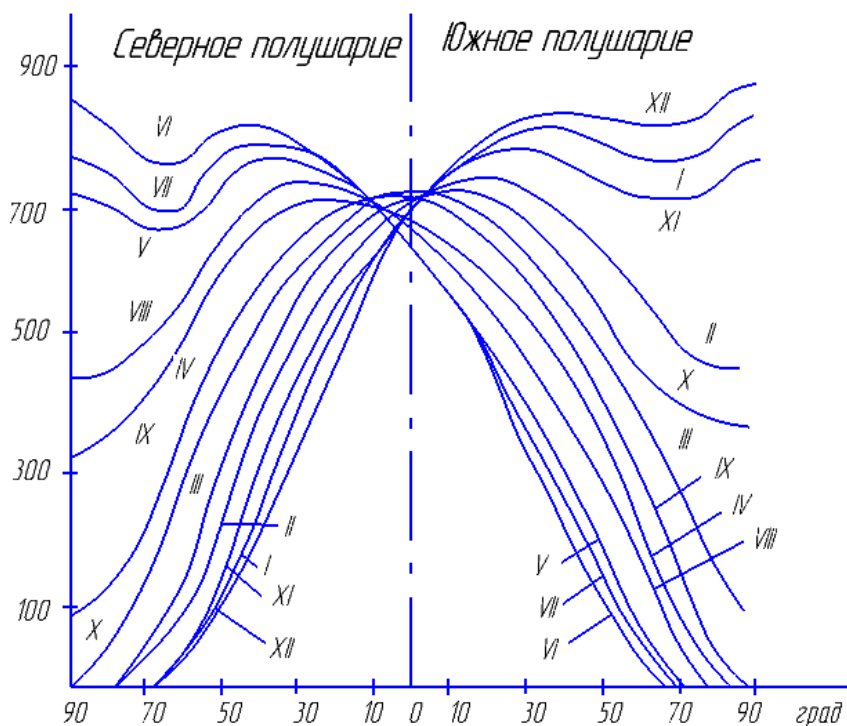


Рисунок 1.4 – Среднемесячные суточные значения суммарной солнечной радиации при безоблачном небе в зависимости от широты местности и времени года (I-XII – месяцы года)

Суточный ход и часовые суммы солнечной радиации зависят от места расположения климатической области и характерных для нее погодных условий. Изменение солнечной радиации оценивается отношением ее максимального значения к минимальному и выражается в процентах. Наименьшее изменение суточных сумм радиации наблюдается в пустынных районах Земли, что объясняется малой облачностью и преобладанием облаков верхнего яруса, незначительно ослабляющих солнечную радиацию. Наибольшее различие между максимальным и минимальным значениями солнечной радиации имеет место в прибрежных районах умеренных широт в связи с частой переменой погодных условий. Наличие паров воды и пыли в воздухе существенно уменьшает интенсивность солнечной радиации.

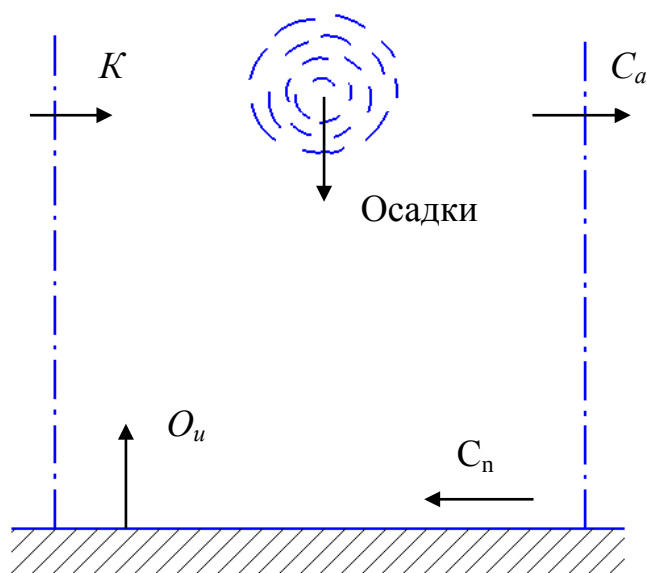


Рисунок 1.5 – Внутренний влагооборот на ограниченной территории

Циркуляция атмосферы это перемещение воздушных масс (течений с различным содержанием теплоты и влаги), а также изменение их свойств, сопровождающееся образованием поверхностей раздела между разными воздушными массами. Основные причины общей циркуляции атмосферы – неодинаковое нагревание Солнцем поверхности Земного шара и вращение Земли. Кроме того, на общую циркуляцию атмосферы влияет изменение ландшафта поверхности Земли, вызывающее постоянно действующие турбулентные потоки отраженного тепла, которые приводят к изменению температуры и плотности воздуха в тропосфере.

Влагооборот – это ряд последовательных физических процессов, происходящих с водой (испарение, конденсация, образование облаков, выпадение осадков), а также перенос влаги. Влагооборот определяет континентальность климата не зависит от неравномерности нагревания Солнцем суши и океана, наличия циркуляции воздушных масс и

изменения ландшафта. Влагооборот между сушей и океаном называют внешним, а в пределах ограниченной территории – внутренним. Внутренний влагооборот (рисунок 1.5) определяется количеством K внешней влаги, которая частично выпадает на территорию в виде осадка O , а частично выносится за ее пределы атмосферным стоком C_a . Часть выпавших осадков $O_{\text{и}}$ испаряется, а часть образует поверхностный сток $C_{\text{п}}$. При гидрометеорологических наблюдениях измеряют количество выпавших осадков и испарившейся влаги. Остальные составные части влагооборота не учитывают.

Одним из основных процессов влагооборота является испарение, которое зависит от радиационного баланса (энергетических ресурсов) и увлажнения поверхности Земли. С увеличением широты местности и снижением солнечной радиации испарение уменьшается.

Вопросы классификации макроклиматических условий Земли с точки зрения их влияния на изделия являются предметом изучения международной технической климатологии. В основу классификации положены усредненные за много лет значения следующих климатических факторов: экстремальной (максимальной и минимальной) температуры за год; максимальной абсолютной влажности воздуха; максимальной температуры в сочетании с относительной влажностью воздуха, равной или превышающей 95 %. В таблице 1.1 приведены группы климатов, определяющие категорию применения элементов согласно данной классификации. Однако микроклиматические условия использования элементов в различных электронных устройствах, комплексах и системах характеризуются более высокими значениями максимальной температуры, чем приведенные в таблице 1.1.

Климатические факторы, существенно влияющие на ЭС. На работу современных ЭС значительное влияние оказывает *температурный режим эксплуатации*, важнейшие показатели которого – абсолютные годовые минимумы и максимумы температуры. Основными факторами, определяющими изменение температуры, являются широта местности, степень континентальности и топографические условия. Влияние первых двух факторов обуславливает плавное и последовательное изменение температуры. Топографические условия (высота над уровнем моря и форма рельефа) нарушают этот плавный ход.

Подводя итог рассмотрению естественных климатических условий, можно сделать вывод, что для различных зон эксплуатации характерны различные сочетание и длительность воздействия климатических факторов. Под влиянием этих факторов в элементах протекают сложные физико-химические процессы, изменяющие их свойства и вызывающие отказы ЭС. Поэтому при конструировании ЭС разработчику необходимо располагать не только допустимыми значениями воздействующих климатических факторов, при которых гарантируется надежная работа ЭС,

но и наиболее полной информацией об изменении характеристик элементов при воздействии этих факторов.

В таблице 1.2 приведены допустимые значения факторов естественных климатических воздействий для конкретных способов монтажа элементов и размещения ЭС на объекте. Допустимые значения этих факторов зависят от конструктивного исполнения ЭС, что связано с тем, что климатические условия, в которых функционирует ЭС, есть совокупность естественных и искусственных воздействий. Последние же, как правило, определяются именно конструктивным исполнением ЭС, а следовательно, влиянием этих воздействий можно управлять.

Из-за наличия в конструкции изделий сопряжений частей из материалов с различными температурными коэффициентами линейного расширения определенную опасность для ЭС представляют резкие колебания температуры окружающей среды. При разности температур ΔT в сопряженных частях конструкции возникают механические напряжения $\gamma = E(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T$, где E – модуль упругости; α_1 и α_2 – температурные коэффициенты линейного расширения материалов сопряженных частей конструкции изделия.

Механические напряжения определяют устойчивость ЭС к температурным колебаниям. При значениях γ , превышающих допустимые, возможно разрушение конструкции ЭС.

Опыт эксплуатации показывает, что для ЭС особенно опасна *повышенная влажность окружающей среды*. Это объясняется исключительно агрессивным воздействием паров воды на большинство используемых в ЭС материалов, приводящим к изменению их электрофизических свойств и механических характеристик. Для защиты от воздействия повышенной влажности элементы ЭС, как правило, герметизируют, используя органические полимерные материалы. Производят покрытие лаками, эмалями, обволакивание компаундами, литьевое прессование в пластмассу, герметизацию в готовые пластмассовые корпуса и т.д. Однако ни один из способов герметизации не обеспечивает идеальной влагозащиты из-за микрополостей в сварных и паяных швах корпусов, а при герметизации полимерными материалами – из-за способности последних сорбировать и пропускать пары воды.

Таблица 1.1 – Группы климатов, значения факторов (усредненные за много лет) естественных климатических воздействий и категории применения элементов ЭС

Группа климата	Минимальная температура, °C	Максимальная температура, °C	Максимальная температура при относительной влажности, равной или превышающей 95 %, °C	Максимальная абсолютная влажность воздуха, г-см ³	Максимальное изменение температуры воздуха за 8 ч, °C	Максимальная интегральная плотность потока солнечной радиации, Вт м ⁻²	Максимальная интенсивность дождя, мм мин ⁻¹	Категория применения
Теплый умеренный	-20	+35	+25	22	40	1125	3	Ограниченное
Холодный умеренный, теплый сухой	-33	+40	+27	24	40	1125	3	Общее
Все климаты Земли, за исключением экстремально холодного и экстремально теплого	-50	+40	+33	36	40	1125	5	Универсальное
Все климаты Земли	-65	+55	+33	36	40	1125	5	В любой точке земного шара

Таблица 1.2 – Допустимые значения факторов естественных климатических воздействий при эксплуатации элементов ЭС

Воздействующий фактор	умеренный				холодный				тропический			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Температура воздуха, °С:												
Максимальная	+40	+40	+40	+35	+40	+40	+40	+35	+45	+45	+45	+45
Минимальная	-40	-40	-40	+1	-60	-60	-60	+1	-10	-10	-10	+1
Отн. влажность воздуха (макс. значение) %	100	100	98	80	100	100	98	80	100	100	98	98
Температура, °С	25	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35
Максимальная интегральная плотность потока солнечной радиации, Вт*м ⁻²	1125	-	-	-	1125	-	-	-	1125	-	-	-
Максимально возможная температура нагрева черной матовой поверхности, °С	+80	-	-	-	+80	-	-	-	+90	-	-	-
Колебания температуры воздуха за 8 ч, °С	+40	+30	+20	-	+40	+39	+20	-	+40	+30	+20	-
Максимальная интенсивность дождя, мм*мнн ⁻¹	3	-	-	-	3	-	-	-	5	-	-	-

Примечание. 1 – элементы наружного монтажа ЭС. Размещаемых на открытом воздухе; 2 – элементы наружного монтажа ЭС, размещаемых под навесом, и внутреннего монтажа ЭС, размещаемых на открытом воздухе; 3 – элементы ЭС, размещаемых в помещениях без искусственного регулирования климатических условий; 4 – элементы ЭС, размещаемых в помещениях с искусственным регулированием климатических условий.

1.3. Биологические воздействия

Биологические воздействия, в которых находятся ЭС, определяются совокупностью воздействующих биологических факторов. Биологический фактор (биофактор) – это организмы или их сообщества, вызывающие нарушение работоспособного состояния объекта. Событие, состоящее в выходе какого-либо параметра ЭС под действием биофактора за границы, указанные в НТД, называют биологическим повреждением (биоповреждением).

Виды биоповреждений. Анализ биоповреждений позволяет выделить четыре их вида (рисунок 1.6): 1) механическое разрушение при контакте организмов с ЭС; 2) ухудшение эксплуатационных параметров; 3) биохимическое разрушение; 4) биокоррозия.

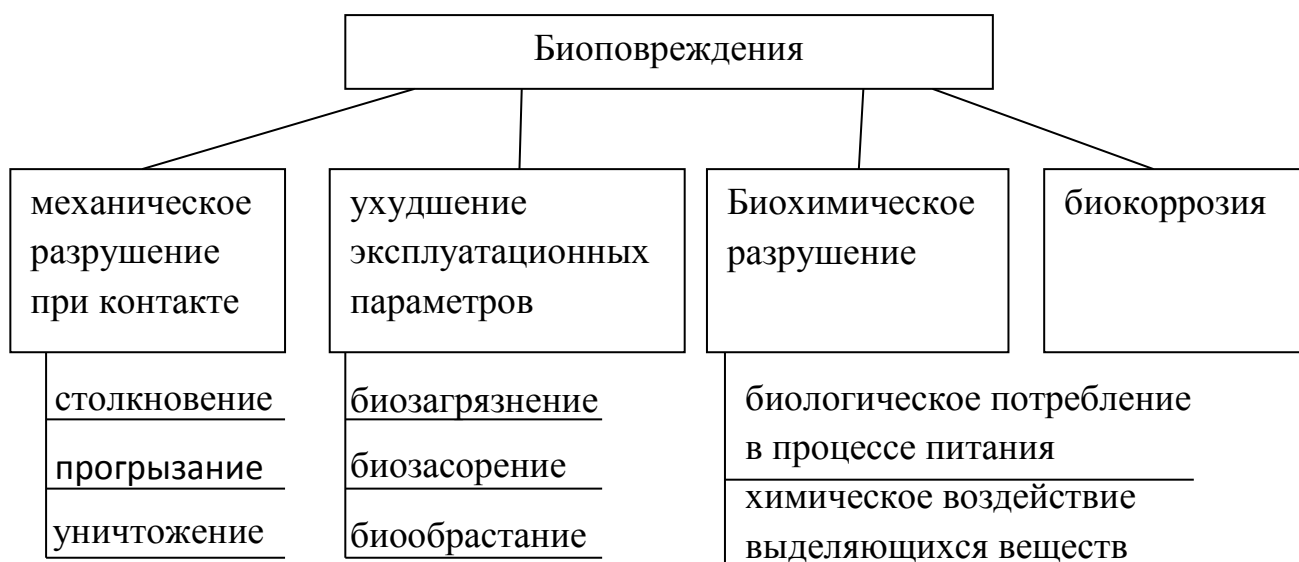


Рисунок 1.6 – Классификация биоповреждений

Механическое разрушение ЭС вызывается в основном макроорганизмами, т.е. организмами, имеющими размеры, сравнимые с габаритами изделий. Макроразрушение при контакте может произойти в

результате столкновения, прогрызания и уничтожения изделия, на пример при столкновении птиц с самолетами и антеннами радиолокационных станций, прогрызании материалов грызунами (крысами, зайцами, белками, слепышами и др.), а также открыточелюстными насекомыми (главным образом различными видами термитов и муравьев). Уничтожение материалов и изделий происходит в основном в процессе питания организмов.

Ухудшение эксплуатационных параметров ЭС вызывается биозагрязнением, биозасорением и биообрастанием. Биозагрязнением называют выделения организмов и продукты их жизнедеятельности, воздействие которых в результате смачивания водой или впитывания влаги из воздуха приводит к изменению параметров изделий. Биозасорение ЭС связано с наличием спор грибов и бактерий, семян растений, частей мицелия грибов, помета птиц, выделений организмов, отмирающих организмов. Обрастание бактериями, грибами, водорослями, губками, моллюсками и другими организмами поверхностей ЭС усиливает коррозию металлов.

Биохимическое разрушение – наиболее широко распространенный вид биоповреждений, но вместе с тем и наиболее трудно поддающийся изучению, так как вызывается в основном микроорганизмами – любыми организмами, имеющими микроскопические размеры и не видимыми невооруженным глазом. Этот вид разрушения разделяют на два подвида: биологическое потребление материалов в процессе питания микроорганизмов и химическое воздействие выделяющихся при этом веществ. Биологическое потребление связано с предварительным химическим разрушением ферментами исходного материала иногда только одного компонента (обычно низкомолекулярного соединения, например пластификатора, стабилизатора). Такое разрушение открывает путь физико-химической коррозии, приводит к ухудшению термодинамических свойств материала и его механическому разрушению под действием эксплуатационных нагрузок. Химическое действие продуктов обмена повышает агрессивность среды, стимулирует процессы коррозии.

Физико-химическая коррозия на границе материал – организм обусловлена воздействием amino- и органических кислот, а также продуктов гидролиза. В основе этого вида биоповреждения, называемого биокоррозией, лежат электрохимические процессы коррозии металлов под действием микроорганизмов.

Характер процессов и механизмов биоповреждений и их влияние на материалы и изделия тесно связаны с ростом и размножением

организмов, которым необходимо постоянно пополнять энергию от внешних источников.

Биофактор как источник биоповреждения. Подавляющее большинство (от 50 до 80%) повреждений ЭС обусловлено воздействием на них микроорганизмов (бактерий, плесневых грибов и др.), развитие и жизнедеятельность которых определяются внешними воздействующими факторами: физическими (влажность и температура среды, давление, радиация и т.д.), химическими (состав и реакция среды, ее окислительно-восстановительные действия), биологическими. Наибольшее влияние на активность микроорганизмов оказывают температура и влажность.

Бактерии – самая многочисленная и распространенная группа микроорганизмов, имеющих одноклеточное строение. Бактерии быстро размножаются и легко приспосабливаются к изменяющимся физическим, химическим и биологическим условиям среды благодаря тому, что они могут адаптивно образовывать ферменты, необходимые для трансформации питательных сред. Одна из особенностей микроорганизмов – их способность к спорообразованию. Образование спор у бактерий не связано с процессом размножения, а служит приспособлением к выживанию в неблагоприятных условиях внешней среды (недостатке питательных веществ, высушивании, изменении рН среды и т. д.), причем из одной клетки формируется только одна спора. Размножение бактерий осуществляется путем деления клеток.

Плесневые грибы, играющие доминирующую роль среди микроорганизмов, отличаются от бактерий более сложным строением. Клетки грибов имеют сильно вытянутую форму и напоминают нити – гифы. Гифы ветвятся и переплетаются, образуя мицелий или грибницу. Особенность грибов – разнообразие способов их размножения: обрывками мицелия, спорами, оидиями, конидиями. Оптимальными условиями для развития большинства плесневых грибов являются высокая влажность (более 85%), температура +20...30°C и неподвижность воздуха. Большую роль при заселении материалов бактериями и грибами играет способность спор адсорбироваться на гладкой поверхности.

Действие микроорганизмов на материалы и элементы ЭС объясняется тем, что благодаря микроскопическим размерам гифы и споры проникают в углубления и трещины материала, прорастают в них, образуя мицелий, который, быстро распространяясь по субстрату, вызывает изменение массы, водопоглощения и степени гидрофобности. Обрастание микроорганизмами зависит от химического состава и строения материала, микрофлоры окружающей среды, наличия загрязнений (органических и неорганических) в воздухе, климатических условий и избирательности действия сообществ организмов. В первую очередь грибы поражают

материалы, содержащие питательные для них вещества. Это ткани из натуральных волокон, белковые клеи, углеводороды, пластмассы, краски, остатки флюсов, растворителей и др. Используя эти материалы в качестве источников углерода и энергии, грибы приводят их в негодность. Однако порче подвергаются и материалы, не содержащие никаких питательных веществ, например разрастание мицелия на поверхности оптического стекла. После удаления грибного налета на стекле остаются следы, напоминающие мицелий, – «рисунок травления». Это следствие разрушения стекла продуктами метаболизма, из которых наиболее агрессивными являются органические кислоты (лимонная, уксусная, щавелевая, винная, яблочная и др.).

Органические кислоты и другие метаболиты, обладая высокой проводимостью, могут быть основной причиной снижения удельных поверхностного и объемного сопротивлений материалов, напряжения пробоя, увеличения тангенса угла диэлектрических потерь, разрушения лакокрасочных покрытий. Эти кислоты, как отмечалось, стимулируют коррозию металлов, которая наносит не меньший вред, чем бактерии.

Под влиянием плесени значительно возрастает интенсивность старения пластмасс, а прочность некоторых стеклопластиков снижается на 20...30 %. Развитие плесневых грибов на электроизоляционных материалах ухудшает их диэлектрические свойства. Образование плесени на поверхностях печатных плат вследствие высокого содержания влаги в клетках грибов (до 90%) приводит к коротким замыканиям между токоведущими частями.

Исследования в электронной промышленности показали, что 45 % готовых ИС содержат споры плесневых грибов 19 видов. Источниками их являются руки рабочих, технологические среды и воздух в помещениях. Заращение ИС колониями «черной плесени» дает 40,7 % брака. Применение горячих операций на начальных стадиях технологического процесса значительно снижает число колоний. Благоприятное действие оказывает и аэрация воздуха в производственных помещениях.

Среди насекомых наибольший вред причиняют *термиты* – «белые муравьи», которые повреждают материалы и изделия, расположенные на пути к пище, месту окукливания и строительства гнезд. Наличие щелей, углублений и других укрытий может привлекать насекомых. Шероховатая поверхность удобна для их передвижения. На холодные предметы насекомые не садятся, а теплые их привлекают. Термиты сначала выгрызают в материале небольшие полости, затем их обживают, вызывая биозасорение и биозагрязнение изделий.

Разрушениям подвергаются прежде всего целлюлозосодержащие (дерево, картон, бумага) и мягкие синтетические материалы и изделия из

пенополиуретана, губчатого полиэтилена, пенополистирола, фенопластов с целлюлозными наполнителями, поливинилхлоридных трубок, резины на основе натурального каучука, стеклопластика на основе ЭДМ-2-2, стеклоткани, пропитанной клеем БФ-2, и т.д. Большие скопления насекомых часто служат причиной коротких замыканий и прочих нарушений работы ЭС.

Среди других видов насекомых наиболее опасны моль (повреждает натуральные и искусственные ткани), жуки-кожееды (разрушают кабели и покрытия), муравьи (засоряют и загрязняют изделия).

Грызуны наносят в основном механические повреждения, вызывающие обрывы, замыкания и нарушения герметизации. В настоящее время известно свыше 300 видов грызунов, из которых наибольший вред причиняют серая, черная, пластинчатозубая и туркестанская крысы, домовая, полевая, лесная и азиатская мыши, белки, бобры, ондатры, кроты, слепыши, зайцы. Грызуны повреждают различные приборы, тару и упаковку, теплоизоляционные материалы, резино-технические изделия, пленки, кабель и т.д. Помимо прямого уничтожения сырья, материалов, изделий грызуны загрязняют их экскрементами, шерстью.

1.4. Космические воздействия

Космические воздействия при эксплуатации ЭС характеризуются совокупностью следующих факторов: электромагнитных и корпускулярных излучений, глубокого вакуума, лучистых тепловых потоков, невесомости, метеорных частиц, магнитных и гравитационных полей планет и звезд и др. При изучении этих факторов выделяют три среды: межзвездную, межпланетную, атмосферу планет и их спутников. Межзвездная среда состоит из межзвездного газа и мельчайших твердых частиц, пыли, заполняющих пространство между звездами в галактиках. Газ почти равномерно перемешан с пылью. Межзвездная среда вблизи Солнца переходит в межпланетную среду, которая заполняет пространство между планетами Солнечной системы. Межпланетная среда состоит из расширяющегося вещества солнечной короны – ионизированных атомов водорода (около 90%) и атомов гелия (около 9 %).

Наибольший интерес для нас представляет атмосфера Земли, главным образом ее внешняя часть – экзосфера. Изменение параметров атмосферы Земли с высотой иллюстрирует таблица 1.3.

Температура характеризует лишь кинетическую энергию частиц газа, которая не оказывает прямого влияния на температуру открытых

поверхностей ЭС, установленных на космических объектах, в силу большой разреженности среды.

Таблица 1.3 – Измерение параметров атмосферы Земли с высотой

Высота, км	Давление, Па	Плотность, г/см ³	Темпе- ратура, К	Концентра- ция частиц, см ⁻³	Характе- ристика вакуума
Уровень моря	$1,33 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	293	$2,7 \cdot 10^{19}$	-
$2 \cdot 10^2$ $3 \cdot 10^2$ $5 \cdot 10^2$	$8,5 \cdot 10^5$ $1 \cdot 10^{-5}$ $4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-13}$ $2,5 \cdot 10^{-14}$ $3 \cdot 10^{-16}$	1200 1500 1600	$7 \cdot 10^9$ $8 \cdot 10^8$ $2,5 \cdot 10^7$	Глубокий
$1 \cdot 10^3$ $2 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^3$ $5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-9}$ $8 \cdot 10^{-10}$ $5 \cdot 10^{-10}$ $4 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-18}$ $2 \cdot 10^{-19}$ $1 \cdot 10^{-19}$ $4 \cdot 10^{-20}$	1600 1800 2000 3000	$1,5 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^4$ $1 \cdot 10^4$ $4 \cdot 10^3$	Очень глубокий
$10 \cdot 10^3$ $20 \cdot 10^3$ $30 \cdot 10^3$ $60 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^{-10}$ $1 \cdot 10^{-10}$ $2,5 \cdot 10^{-11}$ $1,5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-20}$ $2 \cdot 10^{-21}$ $6 \cdot 10^{-22}$ $2,5 \cdot 10^{-22}$	15000 50000 $1 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$ $1 \cdot 10^2$ 10 3-4	Сверхглубокий

Космические излучения в околоземном пространстве. Условия эксплуатации ЭС в космосе характеризуются воздействием на изделия корпускулярных излучений. Поток элементарных частиц высокой энергии, преимущественно протонов, а также ядер гелия (α -частиц) и ядер более тяжелых элементов приходит на Землю изотропно из удаленных областей Галактики. Это первичные космические лучи. Взаимодействуя с атомными ядрами воздуха, они рожают в атмосфере Земли вторичное излучение, которое включает практически все известные элементарные частицы.

В первичных космических лучах различают *галактические лучи*, приходящие извне Солнечной системы, и *солнечные лучи*, связанные с активностью Солнца. Первые характеризуются очень большой энергией частиц (до 10^{21} эВ), но низкой плотностью потоков частиц ($1 \dots 2 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). Солнечные космические лучи испускаются Солнцем только во время хромосферных вспышек, в то время как радиальный поток плазмы солнечной короны (солнечный ветер) присутствует в межпланетном пространстве постоянно. Энергия частиц солнечных космических лучей ($\leq 10^{10}$ эВ) во много раз превышает энергию солнечного ветра.

В 1958 г. были открыты *радиационные пояса Земли*, которые представляют собой относительно стабильные гигантские области скопления заряженных частиц (электронов, протонов, α -частиц и ядер

более тяжелых химических элементов) высоких кинетических энергий, захваченные и удерживаемые магнитным полем Земли. Радиационные пояса Земли имеют сложную структуру (рисунок 1.7). Обычно выделяют внутренний (открыт американскими учеными Дж. Ван Алленом и др.) и внешний (открыт советскими учеными С. Н. Верновым, А. Е. Чудаковым и др.) радиационные пояса, пояс протонов малых энергий и зону квазизахвата частиц. Внутренний пояс характеризуется наличием протонов высоких энергий (20...800 МэВ). В этом поясе имеются также электроны с энергиями 20 кэВ...1 МэВ. Во внешнем радиационном поясе присутствуют электроны с энергиями 40..100 кэВ, а в периоды повышенной солнечной активности в нем появляются электроны больших энергий (1 МэВ и более). Пояс протонов малых энергий содержит протоны энергий около 0,03... 10 МэВ. Зона квазизахвата расположена за внешним поясом. Она имеет сложную пространственную структуру, обусловленную деформацией магнитосферы солнечным ветром. Основными частицами в зоне квазизахвата являются электроны и протоны с энергиями менее 100 кэВ.

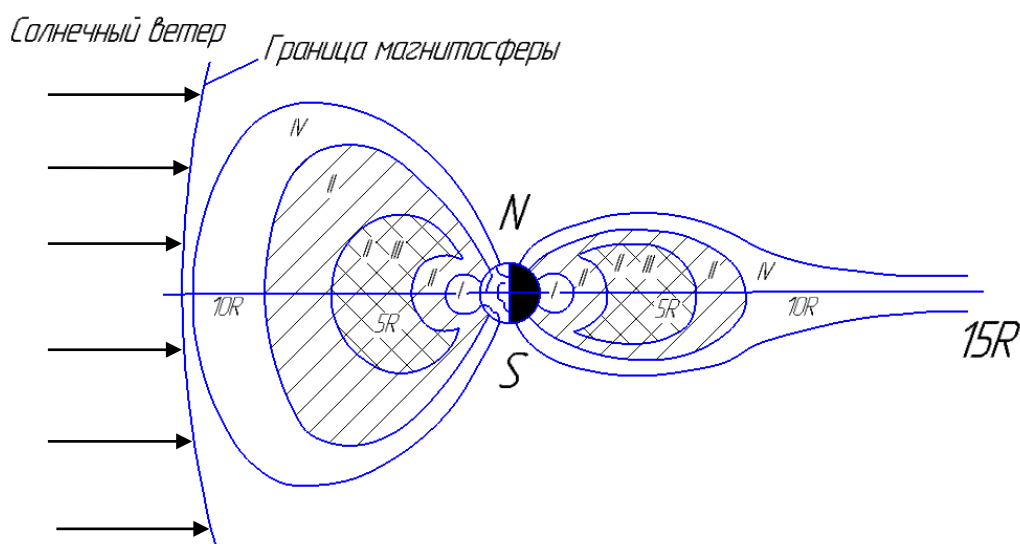


Рисунок 1.7 – Структура радиационных поясов Земли (сечение соответствует полуденному меридиану)

I – внутренний пояс. II – пояс протонов малых энергий, III – внешний пояс, IV – зона квазизахвата. N и S – магнитные полюсы Земли; R – радиус Земли

Рассмотренные радиационные пояса Земли относятся к естественным. Наряду с ними существуют и искусственные радиационные

пояса, которые образуются в результате ядерных взрывов в верхних слоях атмосферы и состоят в основном из электронов. Источником электронов является β -распад осколков деления ядер. В зависимости от места, характера и мощности взрыва искусственные радиационные пояса имеют различные пространственное расположение, интенсивность и время существования.

На рисунке 1.8 изображены зависимости плотностей ϕ корпускулярных потоков от энергии E частиц в околоземном и межпланетном пространствах; в таблице 1.4 приведены характеристики корпускулярных излучений, воздействующих на ЭС в космических условиях.

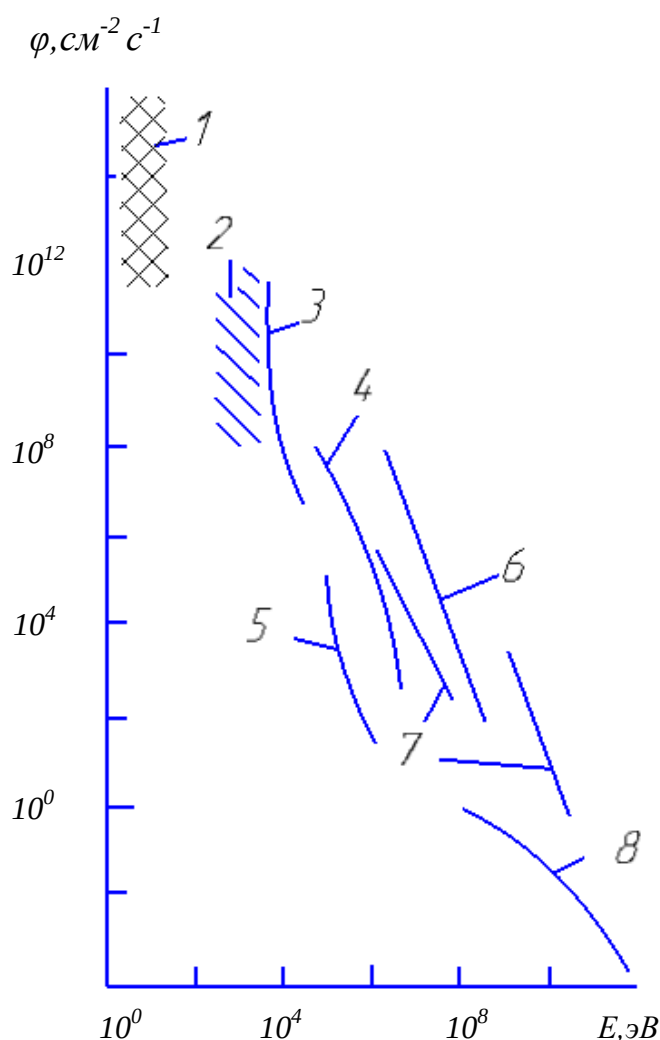


Рисунок 1.8 – Зависимость плотности ϕ корпускулярных потоков от энергии E частиц в околоземном и межпланетном пространствах

1 – молекулы, атомы и ионы O_2 , N_2 , He, H_2 , CO_2 верхних слоев атмосферы Земли и атмосфер других планет, 2 – протоны солнечного ветра; 3 – электроны зон полярных сияний, 4 – электроны радиационных поясов Земли, 5 – протоны в зонах полярных сияний, 6 – протоны радиа-

ционных поясов Земли, 7 – протоны солнечных вспышек; 8 – космические лучи галактического происхождения

Таблица 1.4 – Характеристики корпускулярных излучений

Основная зона радиации	Тип частиц	Энергия частиц, кэВ	Максимально наблюдаемые плотности потоков частиц, см ⁻² с ⁻¹
Протоносфера Земли	p	~1	10^9
Электросфера Земли	e	~1	10^9
Внутренний радиационный пояс Земли	p	>100	10^8
		>30*10 ³	10^5
		>40*10 ³	10^4
Внешний радиационный пояс Земли	e	>100	10^8
		>600	10^7
		>1500	10^5
Искусственный радиационный пояс Земли	e	>40	10^9
		>10 ³	10^8
		>5*10 ³	10^7
Потоки частиц, вызывающие полярные сияния	e	1...10	$10^{11}...10^{12}$
	p	100	10^6
Космические лучи солнечного происхождения	p	>5*10 ³	$10^5...10^6$
	α	>5*10 ³	$10^4...10^5$
Солнечный ветер (спокойное Солнце)	p	~1,5	$3*10^6$
	α	~5	$5*10^7$
Солнечный ветер (вспышки)	p	5...10	$10^{10}...10^{14}$
	α	5...20	$10^9...10^{10}$
Корпускулярные излучения галактического происхождения	p	$10^6...10^{17}$	$3*10^4$
	α	$10^6...10^{17}$	$3*10^3$
	Легкие ядра (Z=3...5)	$10^6...10^{17}$	50
	Средние ядра (Z=6...9)	$10^6...10^{17}$	200
	Тяжелые ядра (Z=10-30)	$10^6...10^{17}$	40

Примечание: p – протоны; e – электроны, α – ядра гелия (α частицы); Z – порядковый номер элемента в Периодической системе элементов.

Ионизирующее излучение (нейтроны, протоны, электроны, γ -лучи и др.) вызывает дефекты, связанные с изменением структуры и ионизацией атомов облучаемого материала. Взаимодействие излучения с веществом иллюстрирует рисунок 1.9.

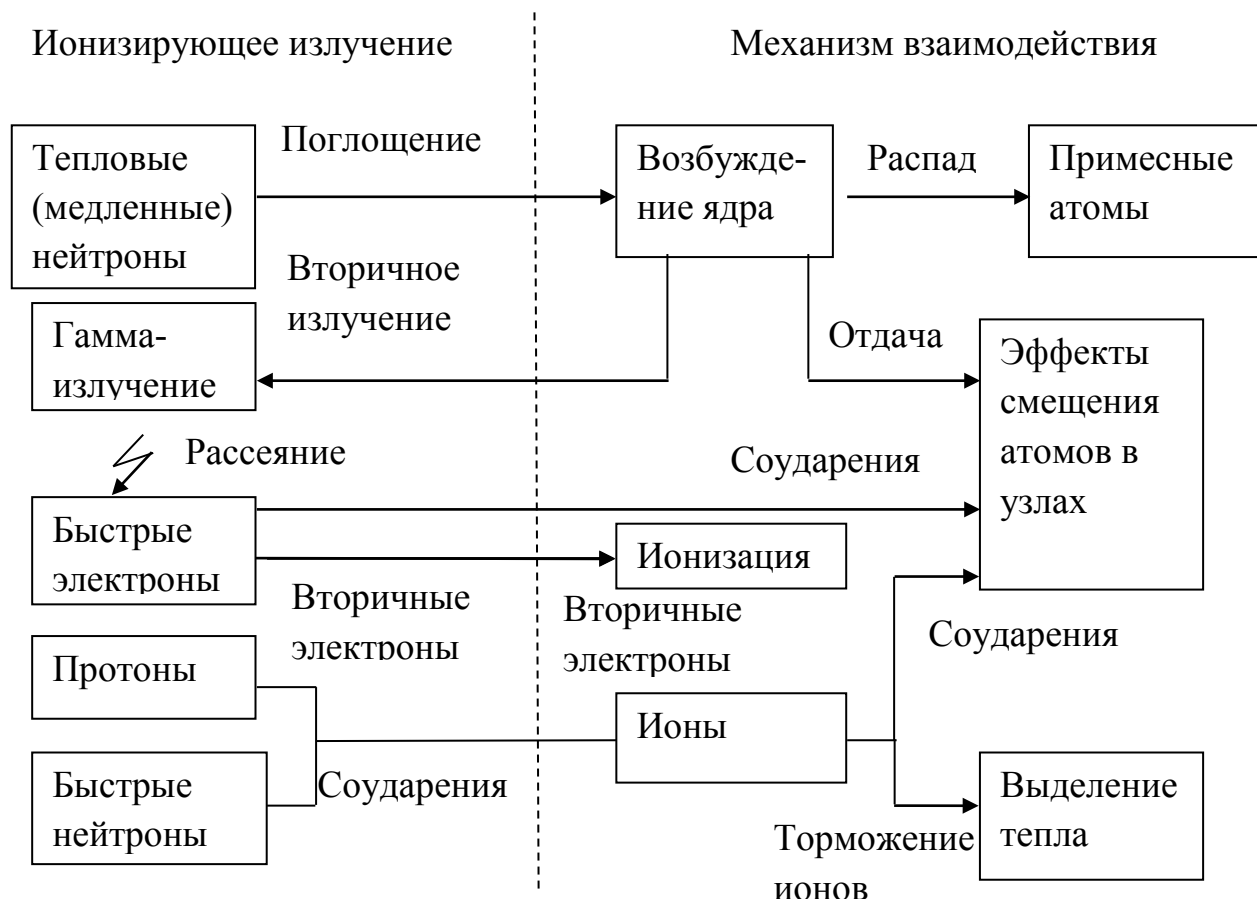


Рисунок 1.9 – Взаимодействие космического излучения с веществом

Термовакuumные факторы космического пространства. Как уже отмечалось, к факторам космического пространства наряду с космическими ионизирующими излучениями относятся глубокий вакуум, лучистые тепловые потоки и невесомость. Эти факторы связаны с нарушением теплообмена в изделиях и специфическим воздействием вакуума. Их называют термовакuumными.

Таблица 1.5 – Характеристика метеорных частиц

Масса, г	Радиус, мкм	Скорость, км/ч	Кинетическая энергия, Дж	Толщина пробиваемого алюминиевого листа, мм
25	49200	28	$1 \cdot 10^7$	213
1,95	36200	28	$3,98 \cdot 10^6$	157
1,58	19600	28	$6,31 \cdot 10^5$	84,8
0,25	10600	28	$1 \cdot 10^5$	45,9
$1,58 \cdot 10^{-2}$	4220	28	$5,87 \cdot 10^3$	17,9
$2,5 \cdot 10^{-3}$	2290	26	$7,97 \cdot 10^2$	9,17
$1,58 \cdot 10^{-4}$	910	23	38,9	3,35
$9,95 \cdot 10^{-6}$	362	20	1,83	1,21
$3,96 \cdot 10^{-8}$	57,4	15	$4,55 \cdot 10^{-3}$	0,164
$6,28 \cdot 10^{-11}$	2,51	15	$7,21 \cdot 10^{-3}$	0,0191

Глубокий вакуум характеризуется крайне низкими концентрациями частиц, плотностью и давлением. На высоте более 10 тыс. км атмосферное давление в космическом пространстве составляет 10^{-11} Па. Однако значения факторов открытого космоса не характеризуют условия работы ЭС. На поверхности космического аппарата и в его отсеках, а также в негерметизированных блоках ЭС за счет испарения материалов конструкций давление существенно выше (порядка $10^{-7} \dots 10^{-2}$ Па). Таким образом, ЭС (и в первую очередь их элементы), размещенные в негерметизированных отсеках космического аппарата, работают при давлении не ниже 10^{-7} Па, т. е. в условиях глубокого вакуума (таблица 1.3).

Тепловое воздействие вакуума проявляется в снижении теплоотвода от энерговыделяющих изделий из-за отсутствия конвективного теплообмена и резкого падения теплопроводности газа. Передача теплоты осуществляется только путем лучистого обмена и контактным способом. Ухудшение теплоотвода от изделий в глубоком вакууме вызывает перегрев и выход из строя ЭС. Поэтому для изделий, работающих при больших удельных мощностях рассеяния, возникает проблема существенного снижения допустимой электрической нагрузки относительно номинального значения.

Одним из основных проявлений воздействия глубокого вакуума на материалы является сублимация - потеря массы материалов и оксидных пленок из-за испарения. Особую опасность сублимация представляет для элементов и частей ЭС, имеющих незащищенные металлы с высоким давлением паров (кадмий, магний, цинк и др.). В результате сублимации и осаждения испаряющихся частиц металла на более холодные поверхности

может возникнуть шунтирование участков поверхности окружающего диэлектрика вплоть до замыкания накоротко отдельных токоведущих частей. Сублимация поверхностных слоев металлов приводит к изменению их прочности, усталостных характеристик, пластичности. Поверхностные трещины как результат сублимации границ зерен и различных скоростей сублимации зерен микроструктуры могут уменьшить оптические отражательную и поглотительную способности материала, изменив тем самым условия теплопередачи через излучения. Скорость сублимации (испарения) металлов и большинства неорганических соединений описывается уравнением Лэнгмюра

$$G = \left(\frac{k}{17,14} \right) \left(\frac{m}{T} \right)^{1/2},$$

где k – равновесная упругость пара при данной температуре; m – масса материала; T – абсолютная температура.

Уменьшение массы органических материалов (полимеров) связано в основном с диффузией легколетучих компонентов и деструкцией длинноцепочных полимеров на более короткие и подвижные фракции. Состав, молекулярная масса фракций и давление, при котором происходит деструкция, неизвестны. Поэтому теряемая масса органических материалов в глубоком вакууме определяется экспериментально.

Газовыделение из материалов и потеря легколетучих компонентов при длительном пребывании материалов в вакууме приводят к изменению параметров, что связано с изменением электрических и теплофизических свойств (электропроводности, теплопроводности и др.). Вследствие удаления защитных газовых и оксидных пленок, размеры которых соизмеримы с длиной световых волн, изменяются излучательная способность и оптические свойства материалов в условиях глубокого вакуума. Для создания мономолекулярного адсорбированного газового слоя на поверхности твердого тела, однажды очищенной в глубоком вакууме, требуется несколько тысяч лет. Это означает, что такие поверхности сохраняются чистыми в течение длительного времени. Контактное взаимодействие очищенных поверхностей характеризуется максимальной адгезией, а при больших пластических деформациях может происходить «холодная» сварка поверхностей, причем прочность соединения достигает 90 % прочности материалов.

При контактировании твердых неметаллических материалов наблюдается также увеличение коэффициента трения. Так, у графита он возрастает в вакууме в 10 раз, а износ в вакууме возрастает еще более интенсивно – в 1000 раз. Увеличение коэффициента трения и наличие холодной сварки необходимо учитывать при конструировании элементов ЭС, предназначенных для работы в глубоком вакууме.

В процессе изменения давления от нормального атмосферного до глубокого вакуума между электродами изделий, находящихся под напряжением 100 В и более, могут наблюдаться электрический пробой, коронный и тлеющий разряды, что приводит к нарушению работоспособности ЭС. Наиболее опасной с точки зрения проявления этих эффектов является область давлений $10^{-4} \dots 10^{-1}$ Па

Основным источником *лучистых тепловых потоков* в космическом пространстве служит Солнце. На каждый квадратный метр обращенной к Солнцу поверхности космического аппарата в окрестности Земли ежесекундно поступает около 1400 Дж энергии, переносимой солнечным электромагнитным излучением. Энергия в спектре излучения распределяется следующим образом: 9 % приходится на ультрафиолетовое излучение; 46,1% – на видимое излучение; 44,4 % – на инфракрасное; остальное – на рентгеновское и корпускулярное излучения. В инфракрасном и видимом диапазонах энергия отдельных квантов слишком мала, чтобы излучение могло оказывать физико-химическое воздействие на вещество. Инфракрасные лучи переносят тепловую энергию, вызывая нагрев элементов и материалов открытых ЭС. При уменьшении длины волны λ энергия квантов излучения возрастает и может стать достаточной для разрыва молекулярных связей или появления радиационных дефектов в веществах.

Под действием ультрафиолетового излучения могут меняться свойства оптических материалов и терморегулирующих покрытий, красителей и органических материалов, поверхностная электропроводность и т. д. Однако с уменьшением длины волны λ резко падает интенсивность излучения. Поэтому ультрафиолетовое излучение проникает в большинство материалов на глубину несколько микрометров и все повреждения происходит лишь в поверхностном слое.

Земля, как и другие планеты, посылает на поверхность космического объекта длинноволновое излучение – тепловой поток, который складывается из отраженного облаками, атмосферой и поверхностью Земли солнечного излучения, а также собственного теплового излучения. На низких орбитах плотность теплового потока может достигать 40 % плотности потока прямого солнечного излучения, но с увеличением высоты она уменьшается.

Тепловые потоки, идущие на космический объект от звезд, практически малы. Энергия излучений участков межзвездного пространства, лишенных каких-либо источников, соответствует температуре 2,7...4 К. До такой температуры охладилась бы поверхность космического аппарата и, следовательно, ЭС, находящиеся в нем, при отсутствии притока тепла от внешних или внутренних источников. В

тепловой баланс космического аппарата и ЭС вносят определенный вклад лучистые тепловые потоки.

Невесомость как фактор космического пространства имеет место при свободном орбитальном полете космического аппарата и является следствием уравнивания силы гравитации силами инерции. По воздействию на ЭС невесомость следует рассматривать как фактор, оказывающий влияние лишь на тепловой режим изделий через изменение гидродинамики теплоносителей, процессов кипения и конденсации хладагентов. Поэтому невесомость учитывают только для ЭС, размещаемых в герметизированных отсеках космических аппаратов.

Тепловое воздействие невесомости, так же как и вакуума, характеризуется отсутствием конвективной составляющей теплоотдачи от энерговыделяющих изделий. Использование для охлаждения принудительной циркуляции газа в условиях орбитального полета практически устраняет эффект воздействия невесомости. Однако если при этом имеются «застойные» зоны, в которых скорость потока газа близка нулю, то в них эффект невесомости проявляется достаточно сильно.

1.5. Механические воздействия

При эксплуатации и транспортировке ЭС подвергаются механическим воздействиям: вибрационным, ударным и линейным нагрузкам, а также звуковому давлению (акустическим шумам). Это относится как к специальным наземным и транспортным объектам, так и к летательным аппаратам, в которых применяются ЭС.

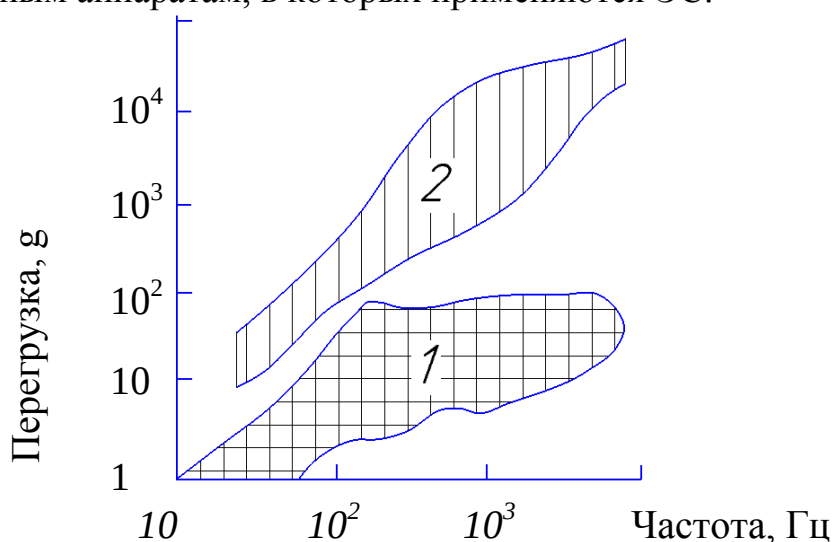


Рисунок 1.10. Уровни вибрационных воздействий, которым подвергаются ЭС: 1-вибрация; 2-вибрация, возбуждаемая ударом

Уровни вибрационных воздействий показаны на рисунке 1.10. Требования по механическим нагрузкам на ЭС, работающим в нестационарных условиях, например на подвижных объектах, постоянно ужесточаются, что видно из рисунка 1.11.

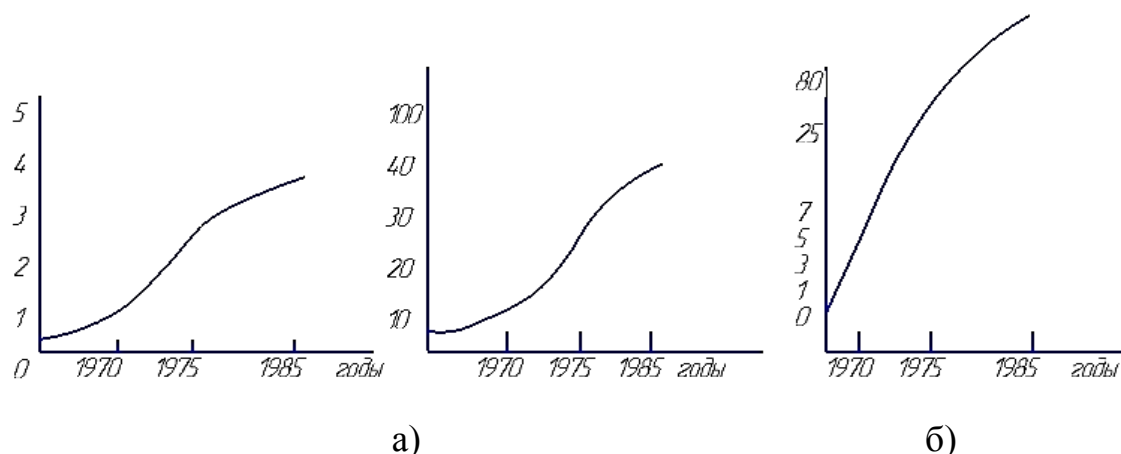


Рисунок 1.11 – Изменение требований по вибрационным (а), линейным и ударным (б) нагрузкам

Вибрация – один из самых опасных и наиболее часто встречающихся на практике видов механических воздействий. В общем случае под вибрацией понимают колебания самого изделия или каких-либо частей его конструкции. Вибрации приводят к поломкам конструкции, обрывам проводов и кабелей, нарушению герметичности, к механическим напряжениям и деформациям в ЭС. Наиболее часто вибрационные нагрузки возникают на самолетах и ракетах. Вибрации зависят от типа летательного аппарата, места расположения ЭС, способа их монтажа и крепления и обусловлены работой силовой установки управления, а также аэродинамической вибрацией. Первые вызываются в основном автоколебаниями рулей и элеронов и характеризуются сравнительно высокой частотой, кратной половине скорости вращения двигателя. Вторые обычно появляются при возникновении областей срыва воздушного потока и образовании вихрей и отличаются нерегулярностью. Механическая прочность, необходимая для нормального функционирования ЭС во время и после воздействия на них различных вибрационных нагрузок, должна быть заложена на этапе проектирования изделий. Для этого ЭС рассматривают как механические системы и применяют аналитические методы расчета их механических характеристик.

Приведем простой пример, когда изделие может быть представлено в виде механической колебательной системы с одной степенью свободы (рисунок 1.12). Система состоит из груза массой m , пружины с жесткостью C и демпфера вязкого трения с коэффициентом демпфирования η .

Движение массы m определяется изменением только одной координаты x под действием возбуждающей силы $F_{осн}$. Уравнение движения системы может быть получено на основе принципа Даламбера, согласно которому в каждый момент времени все силы, действующие на систему, находятся в равновесии, если в их число входит сила инерции. В общем случае дифференциальные уравнения движения любой колебательной механической системы могут быть составлены на основе уравнения Лагранжа в обобщенных координатах. На систему, изображенную на рис. 1.12, действуют: возбуждающая сила

$$F_{осн} = A \sin \omega t, \quad (1.1)$$

приводящая к колебаниям опорного основания (например, стола вибростенда) с частотой ω и амплитудой A ; сила инерции $m\ddot{x}$ ($\ddot{x}$ – ускорение); сила вязкого демпфирования $\eta\dot{x}$ ($\dot{x}$ – скорость), пропорциональная мгновенной скорости массы и направленная в сторону, противоположную этой скорости; сила упругости пружины Cx (x – координата центра масс груза).

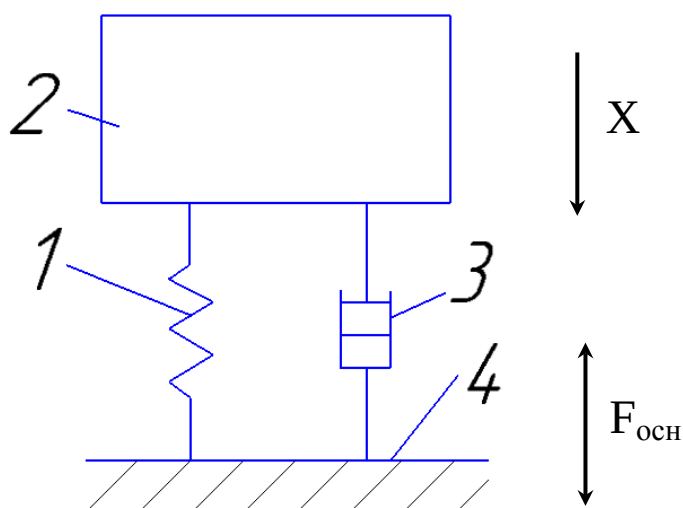


Рисунок 1.12 – Схема линейного осциллятора с вязким трением:

1 – пружина; 2 – груз; 3-демпфер; 4-стол вибростенда

Уравнение движения массы m относительно положения статического равновесия имеет вид

$$m\ddot{x} + \eta\dot{x} + Cx = A \sin \omega t . \quad (1.2)$$

Разделив правую и левую части уравнения (1.2) на m , после

преобразования получим

$$\ddot{x} + 2\delta_0\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = \omega_0^2X_{cm}\sin\omega t, \quad (1.3)$$

Где $\delta_0 = \eta/(2\sqrt{mC})$ – параметр, пропорциональный коэффициенту демпфирования; $\omega_0 = \sqrt{C/m}$ – угловая частота собственных недемпфированных колебаний системы;

$X_{cm} = A/C$ – удлинение пружины, которое она получила бы под действием статической силы, равной амплитуде A возбуждающей силы.

Решение уравнения (1.3) может быть представлено в виде суммы свободных и вынужденных колебаний:

$$x = Ae^{-\delta_0\omega_0 t}\sin(\omega_0 t - \varphi_0) + \mu X_{cm}\sin(\omega t - \varphi), \quad (1.4)$$

где φ_0 и φ – начальные фазы;

$$\mu = \left(\sqrt{4\delta_0^2\nu^2 + (1 - \nu^2)^2} \right)^{-1} \quad (1.5)$$

– коэффициент динамичности, показывающий, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при действии возбуждающей силы вида (1.1) больше статического отклонения пружины;

$\nu = \omega/\omega_0$ – безразмерный параметр, пропорциональный частоте возбуждающей силы.

Из первого слагаемого уравнения (1.4), представляющего выражение для свободных колебаний системы при наличии демпфирования, видно, что даже при малом значении δ_0 множитель $e^{-\delta_0\omega_0 t}$ с течением времени стремится к нулю и, следовательно, свободные колебания затухают.

Установившиеся вынужденные колебания определяются вторым слагаемым (1.4). Особенность этих колебаний состоит в том, что их амплитуда зависит не только от параметров системы и возбуждающей силы, но и от частоты ω . При $\nu = \sqrt{1 - \delta_0^2}$ коэффициент динамичности максимален:

$$\mu_{max} = 1/\left(2\delta_0\sqrt{1 - \delta_0^2}\right) = Q/\sqrt{1 - \delta_0^2} \quad (1.6)$$

где $Q = 1/(2\delta_0)$ – добротность механической колебательной системы, зависящая от количества энергии, рассеиваемой при вибрации.

Чем выше добротность, тем меньше затухание колебаний и тем острее пик резонансной кривой. Если частота ω возбуждающей силы совпадает с собственной частотой ω_0 механической системы без трения ($\delta_0 = 0, \nu = 1$), то происходит резонансное колебание. В этом случае нагрузки на ЭС возрастают в несколько раз. При нулевых начальных условиях (в отсутствие трения) уравнение (1.4) для предельного случая резонансного состояния рассматриваемой системы принимает вид

$$x = -(\omega_0 X_{cm} \cos \omega_0 t) / 2 \quad (1.7)$$

Из формулы (1.7) видно, что амплитуда резонансных колебаний линейно зависит от времени t и частоты ω_0 собственных колебаний. При наличии трения в механической системе резонансный пик будет тем выше, чем большее время изделие находится в резонансном режиме и чем выше собственная частота конструкции.

Время достижения установившейся амплитуды резонансных колебаний реальных изделий измеряется, как правило, долями секунды. Ширина $2\Delta f$ резонансной полосы частот определяется разностью частот f'' и f' ($f'' > f'$), при которых амплитуда A колебаний уменьшается до $1/\sqrt{2} \cong 0,7$ своего значения при резонансе (рисунок 1.13). Так как $f' = f_0[1 - 1/(2Q)]$, $f'' = f_0[1 + 1/(2Q)]$, где f_0 – резонансная частота, то

$$2\Delta f = f'' - f' = f_0' Q \quad (1.8)$$

Отсюда

$$Q = f_0 / (2\Delta f) \quad (1.9)$$

Для расчета добротности изделия необходимо после настройки на резонанс измерить амплитуду колебаний, затем уменьшать частоту до тех пор, пока амплитуда колебаний не станет равной 0,7 амплитуды при резонансе. Полученная частота будет соответствовать частоте f' . Аналогичные действия следует провести, увеличивая частоту до значения f'' . Тогда, вычислив $2\Delta f$ по (1.8) и зная f_0 , можно по (1.9) найти добротность Q .

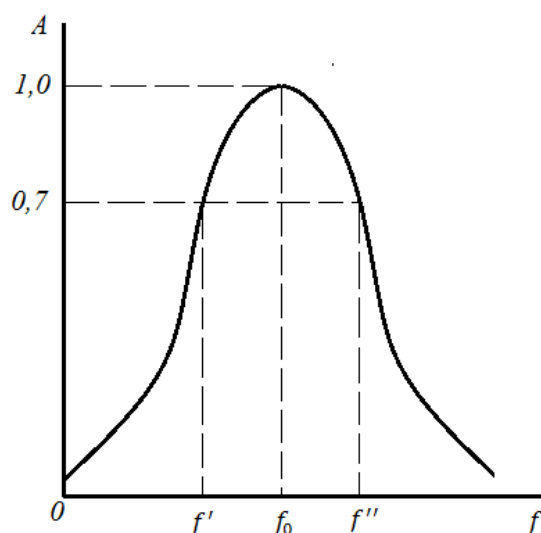


Рисунок 1.13 – Резонансная характеристика механической колебательной системы с одной степенью свободы

Механическая модель, приведенная на рисунок 1.12, приемлема для исследования характеристик не всех видов ЭС, так как большая их часть представляет собой сложные механические системы. Резонанс конструкций этих систем – не всегда худший случай с точки зрения работоспособности ЭС. В то же время резонанс отдельного элемента конструкции изделия независимо от резонанса всей его конструкции может привести к нарушению работоспособности всего изделия. Для расчета резонансных частот элементов конструкции сложных систем целесообразно изображать последние в виде совокупности изолированных элементов, а связи между ними заменять определенными условиями их закрепления. Метод анализа сложных механических систем путем расчета отдельных элементов получил в промышленности название поузлового метода.

Удар. Ускорения, возникающие при резком изменении скорости или направления движения объекта, в котором применяются ЭС, вызывают механическое воздействие на них в виде удара. Вследствие удара возникают силы, деформирующие конструктивные элементы изделий и приводящие к образованию в них механических напряжений. Последние могут служить причиной разрушения изделий. Удар, как правило, сопровождается возбуждением затухающих колебаний, т.е. неустановившейся вибрацией на частотах собственных колебаний

конструктивных элементов изделий. Уровни разрушающих усилий возрастают, если элементы конструкции резонируют на частотах возмущений, вызванных ударом. Если на ЭС действует серия ударов в виде импульсов, следующих один за другим, то возникающую вибрацию называют тряской.

Акустический шум. Особый интерес представляют так называемые баллистические волны, образующиеся от артиллерийских или реактивных снарядов, а также от самолетов, пролетающих через рассматриваемую среду со сверхзвуковой скоростью. Некоторые виды вибрации также сопровождаются выделением энергии звуковой частоты. Это явление принято называть акустическим шумом или акустической вибрацией.

Выделение энергии колебаний звуковой частоты сопровождается механическими колебаниями частиц среды воздуха, которые приводят к изменению давления по сравнению с атмосферным (статическим). Разность между статическим давлением и давлением в данной точке звукового поля называется звуковым давлением. Колебательное движение частиц среды при распространении звуковой волны характеризуется также колебательным смещением их от положения покоя. Скорость распространения звуковых волн в воздухе зависит в основном от температуры среды по закону

$c \cong 331\sqrt{T/273}$. При нормальном атмосферном давлении $p=101\ 300$ Па и $T=273$ К (0°C) скорость звука равна 331 м/с. С повышением температуры до 290 К она увеличивается до 340 м/с.

На распространение звуковых волн в атмосфере большое влияние оказывают ее неоднородности. При этом скорость звука зависит не только от температуры воздуха, но и от его влажности, а также направления и силы ветра.

Акустический шум приводит к механическому возбуждению различных конструктивных элементов изделия, которые, в свою очередь, по-разному реагируют на звуковую мощность шумового спектра. Под действием энергии колебаний звуковой частоты в электронных лампах возникает микрофонный эффект; начинают вибрировать реле, отдельные малогабаритные комплектующие элементы, объемные проводники.

В зависимости от места установки различают наземные, корабельные и самолетные ЭС. Обобщенные значения воздействующих на них факторов и пределы их изменения приведены в таблице 1.6 и служат критериями для проверки конструкции изделий.

Таблица 1.6 – Обобщенные значения воздействующих факторов в зависимости от места установки ЭС

Воздействующий фактор	ЭС		
	наземные	корабельные	самолетные
Вибрация:			
частота, Гц	10...70	0...120	5...2000
ускорение, g	1...4	1,5...2	До 20
Многократные удары:			
ускорение, g	10...15	15	6... 12
длительность, мс	5... 10	5...10	До 15
Одиночные удары:			
ускорение, g	50...1000	До 1000	–
длительность, мс	0,5...10	0,5.. 2	–
Температура максимальная, К:			
Рабочая	323	303...333	333...473
Предельная	333	338	353...523
Температура минимальная, К -			
Рабочая	233	233	213
Предельная	223	223	213
Влажность относительная, %, при температуре, К	80...93 213	98...100 308...323	93...100 320...330
Акустические шумы:			
уровень, дБ	85...125	75...140	130...150
частота, Гц	50...1000	50...1000	50...1000
Атмосферное давление, Па:			
Максимальное	$10,6 \cdot 10^4$	$10,6 \cdot 10^4$	$10,6 \cdot 10^4$
Минимальное	$5,7 \cdot 10^4$	$8,8 \cdot 10^4$	$0,2 \cdot 10^4$
Линейное ускорение, g			
Замедленное	2...4	–	4...6
Центробежное	2...5	–	4...10
Ветровая нагрузка, м/с:			
Работая	До 50	До 50	–
Предельная	До 70	До 70	–

При создании ЭС для ракетной техники руководствуются более жесткими требованиями к условиям эксплуатации [16]: вибрация в диапазоне 0...50 Гц при ускорении 20g; ударное сотрясение 5...10g при длительности импульса действия 10...12 мс со скоростью 40.. 80 ударов в минуту; акустические шумы 130... 170 дБ при частоте 50...1000 Гц;

максимальная рабочая температура 323...473 К и минимальная 223 К; линейное ускорение 5...50g; атмосферное давление 13,3 Па.

Результаты влияния дестабилизирующих факторов на материалы, конструктивные элементы и готовые изделия представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Влияние дестабилизирующих факторов на материалы, конструктивные элементы и готовые изделия

Воздействующий Фактор	Основные вызываемые или ускоряемые процессы	Характер проявления процессов
Вибрация	Механические напряжения Нарушение электрических контактов Усталостные изменения	Потеря механической прочности Неустойчивость функциональных параметров Ускорение износа; разрушение конструктивных элементов
Удары, линейное ускорение Высокая температура	Механические напряжения Химические реакции Размягчение, плавление, возгонка	Разрушение конструктивных элементов Изменение электрических свойств; нарушение структуры Разрушение изоляции
Низкая температура	Образование льда Появление хрупкости Линейное сжатие	Изменение электрических свойств Потеря механической прочности; развитие трещин Разрушение конструкций; ускоренный износ подвижных частей
Термоудар	Механические напряжения	Разрушение конструктивных элементов; нарушение герметичности
Высокая относительная влажность	Поглощение влаги Коррозия Электролиз	Вспучивание, разрыв корпуса; снижение электрической прочности, сопротивления изоляции Уменьшение механической прочности; неустойчивость функциональных параметров Ухудшение электрических свойств; повышение проводимости изоляторов
Низкое давление	Увеличение габаритных размеров изделия Обезгаживание	Растрескивание корпуса взрывное разрушение Изменение электрических свойств; уменьшение механической прочности

Продолжение таблицы 1.7

Воздействующий фактор	Основные вызываемые или ускоряемые процессы	Характер проявления процессов
	Снижение электрической прочности воздуха	Пробой изоляции и образование дуги; возникновение коронного разряда и ионизация воздуха (образование озона)
Солнечная радиация	Фотохимические и физико-химические реакции	Разрушение поверхности; изменение электрических свойств; образование озона
Песок и пыль	Истирание Засорение	Ускорение износа; неустойчивость функциональных параметров Изменение электрических свойств
Соляной туман	Коррозия Электролиз	Ускорение износа; потеря механической прочности; изменение электрических свойств; неустойчивость параметров Разрушение поверхности; увеличение проводимости
Воздействие частиц с высокими уровнями энергии (ядерная реакция)	Нагрев Ядерные превращения и ионизация	Старение материалов Изменение химических, физических и электрических свойств; образование газов и вторичных частиц
Невесомость	Отсутствие конвекционного охлаждения	Усиление явлений, наблюдаемых при высоких температурах
Агрессивные среды	Химические реакции Растрескивание; появление хрупкости Снижение электрической прочности воздуха	Изменение электрических свойств; неустойчивость функциональных параметров Потеря механической прочности Пробой изоляции и образование дуги

1.6. Проблемы проведения испытаний ЭС

В производстве ЭС реальные условия их эксплуатации обычно моделируют, проводя лабораторные испытания в специальных подразделениях контроля и испытаний. В зависимости от характера воздействующих в лабораторных и производственных условиях факторов различают механические, климатические, биологические и космические испытания. Особую группу испытаний составляют испытания на надежность. В результате проведения испытаний определяют качество продукции.

Все свойства, определяющие качество продукции, можно разбить приблизительно на два класса: 1) выявляемые за очень короткое время (внешний вид изделий, их геометрия, масса), а также характеризующиеся такими параметрами изделий, которые не претерпевают существенных изменений во времени; 2) выявляемые во время работы изделий под нагрузкой в течение некоторого промежутка времени. К последним относится, например, состояние поверхности ИС. Его можно оценить с помощью таких параметров, как обратный ток и пробивное напряжение p - n -перехода, зависящие либо от утечки тока по поверхности, либо от скорости поверхностной рекомбинации и значительно изменяющиеся под нагрузкой во времени. Изделия, обладающие дефектами, которые могут быть выявлены только по истечении определенного времени работы под нагрузкой, называют потенциально ненадежными. Цель испытаний ЭС состоит в выявлении потенциально ненадежных изделий, так как явно дефектные изделия легко могут быть отбракованы по результатам разового измерения контролируемых параметров и сравнения их с требованиями НТД. Поэтому рассмотрим вопросы приемочного контроля качества потенциально ненадежных изделий.

Под надежностью изделий понимают его свойство сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения состоит из сочетаний свойств: безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости. Это определение надежности справедливо как для восстанавливаемых (ремонтпригодных), так и для

невосстанавливаемых (неремонтопригодных) изделий. Часть ЭС относится к восстанавливаемым изделиям, так как сборочные операции по их изготовлению, как правило, обратимы, т.е. возможны разборка конструкций изделий и замена отказавших элементов. В то же время, например, интегральные схемы – невосстанавливаемые изделия. Более того, в большинстве случаев невозможна даже частичная утилизация элементов и материалов забракованных ИС. По мере микроминиатюризации ЭС не только узлы, но и целые электронные устройства изготавливают в интегральном исполнении, и изделия все в большей степени становятся неремонтопригодными, т. е. большой класс ЭС начинает относиться к невосстанавливаемым изделиям.

Надежность как свойство изделия закладывается в процессе проектирования и изготовления, а при испытаниях по показателям надежности производится ее оценка и сопоставление с требованиями эксплуатации.

Адекватность условий испытаний реальным условиям эксплуатации ЭС. Исследования, анализ и опыт эксплуатации ЭС показывают, что существует значительное расхождение между показателями надежности, получаемыми в условиях эксплуатации и расчетным путем или при испытаниях в лабораторных и производственных условиях. Это расхождение обусловлено тремя основными группами причин:

- 1) несоответствием внешних воздействий, моделируемых при лабораторных испытаниях, реальным внешним воздействиям на ЭС;
- 2) наличием различных методик установления отказов, что связано, прежде всего, с использованием различных критериев отказов при лабораторных испытаниях и эксплуатации;
- 3) отличием эксплуатационных режимов работы ЭС от режимов при испытаниях.

Проблему адекватности условий испытаний реальным условиям эксплуатации ЭС можно решить, уменьшая по возможности указанные различия. При этом особую сложность представляет минимизация причин первой группы. Это связано с тем, что степень соответствия моделируемых внешних воздействий реальным воздействиям определяется не только полнотой знаний о многофакторных условиях эксплуатации, но и техническими возможностями используемых для испытаний устройств, включающих испытательное оборудование (как

правило, испытательные стенды или камеры, служащие для воспроизведения условий испытаний), контрольно-измерительную аппаратуру, приспособления и оснастку. С усложнением ЭС существенно возрастают требования к устройствам для испытаний. Однако совершенствование последних является не только сложной технической, но и экономической проблемой. Например, устройства для испытаний на широкополосную случайную вибрацию, обеспечивающие высокую адекватность условий испытаний и эксплуатации, стоят в 100... 1000 раз дороже устройств для испытаний на синусоидальную вибрацию. Поэтому на практике при конструировании испытательных устройств приходят к компромиссным решениям, стремясь, с одной стороны, создать дешевые устройства, а с другой – обеспечить адекватность условий испытаний реальным условиям эксплуатации. При этом не следует упрощать испытания или заменять один вид нагрузки другим без тщательного предварительного анализа. Изложенное можно продемонстрировать сравнением двух видов наиболее распространенных нагрузок, применяемых при технологической тренировке ИС: электрической и термической. Безусловно, испытания под термической нагрузкой являются более дешевыми. Но являются ли они более эффективными, чем испытания под электрической нагрузкой, с точки зрения выявления потенциально ненадежных изделий? Для ответа на этот вопрос рассмотрим приведенные на рисунок 1.14 обобщенные зависимости интенсивности отказов полупроводниковых приборов от нормализованной температуры ⁴ и отношения рабочей мощности рассеяния к ее максимальному значению. Анализ кривых показывает, что при постоянстве мощности рассеяния на коллекторе с ростом температуры окружающей среды интенсивность отказов не меняется вплоть до определенного значения, после которого она резко возрастает. Это значение температуры соответствует предельной температуре *p-n* – переходов приборов. Однако, как видно из рисунка 1.14, одной и той же предельной температуре перехода соответствует различная интенсивность отказов, что связано с механизмом нагревания за счет повышения мощности рассеяния на коллекторе или температуры окружающей среды.

⁴ Нормализованная температура $T_n = (T_{раб} - T_{сн}) / (T_{мах} - T_{сн})$, где $T_{раб}$ – температура окружающей среды (для мощных приборов – температура теплоотвода, при которой они работают);

$T_{сн}$ – температура, начиная с которой требуется (по ТУ) ослабление электрического режима;

$T_{мах}$ – максимально допустимая температура *p-n*-перехода.

В первом случае интенсивность отказов выше. Следовательно, для выявления потенциально ненадежных приборов испытания под электрической нагрузкой более эффективны, чем испытания под термической нагрузкой. При этом следует учесть, что при работе полупроводниковых приборов и ИС под электрической нагрузкой выявляют такие отказы, которые зачастую невозможно обнаружить при термических нагрузках.

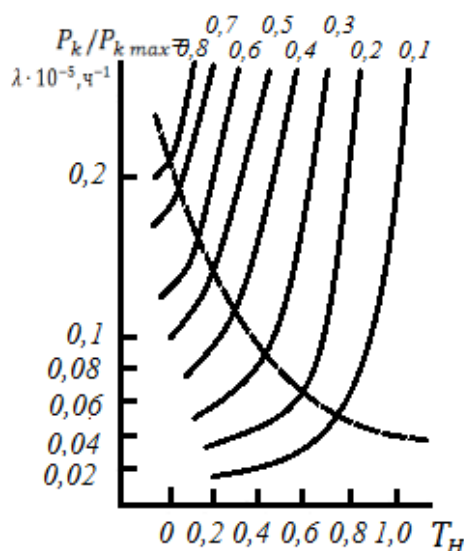


Рисунок 1.14 – Обобщенные кривые зависимости интенсивности отказов от нормализованной температуры и отношения рабочей мощности рассеяния на коллекторе к ее максимальному значению

Нередко проблему адекватности испытаний реальным условиям эксплуатации ЭС пытаются решать, увеличивая нагрузки при испытаниях и выбирая более жесткие допустимые пределы изменения параметров испытываемых изделий для ускорения их отказа. Однако при этом следует иметь в виду следующие обстоятельства. Каждое изделие характеризуется определенной прочностью, т.е. способностью сопротивляться воздействию внешних сил, не разрушаясь и не получая остаточных деформаций. Предположим, что изделие обладает некоторой прочностью P и подвергается воздействию нагрузки G . До тех пор пока $P > G$, изделие работоспособно; при $P < G$ происходит отказ. Прочность всех однотипных изделий не может быть абсолютно одинаковой. Различные дефекты материалов и технологии уменьшают прочность. Для случаев, когда выполняется неравенство $P - G = \xi > 0$, где ξ – сколь угодно малая величина, отказ не произойдет. Вероятность безотказной работы изделия в

зависимости от значений величин Π и G на любой момент времени имеет вполне определенное распределение:

$$P = \int_0^{\infty} \phi(\xi) d\xi ,$$

где $\phi(\xi)$ – функция распределения ξ .

Поэтому предельное значение воздействующей нагрузки устанавливают, как правило, одинаковым для всех изделий данного типа и с помощью известного закона распределения выбирают равным предельному значению нагрузки того изделия, которое имеет в этой совокупности наименьшую прочность по сравнению со всеми другими. Но прочность изделия в результате его старения и износа со временем уменьшается, причем скорость этого процесса зависит от приложенной нагрузки. Чем больше нагрузка при испытании, тем быстрее произойдет накопление напряжений, которое может привести либо к разрушению изделия во время испытаний, либо к ускоренному старению и разрушению его при эксплуатации в результате ускорения протекающих в нем физикохимических процессов. Нагрузка, выбранная с соответствующим запасом и рекомендованная потребителю при эксплуатации ЭС, называется предельно допустимой нагрузкой. Необходимый запас прочности выбирается изготовителем исходя из возможности обеспечения в течение заданного времени установленных в ТУ показателей надежности выпускаемых изделий. Поскольку эти показатели зависят от многих переменных, характеризующих как отдельные, так и совместные влияния нагрузок и внешней среды, предельно допустимую нагрузку, как правило, устанавливают экспериментальным путем.

При установлении предельно допустимых нагрузок ЭС в процессе эксплуатации наряду с обеспечением требуемой надежности следует учитывать эффективность применения ЭС в определенном объекте. Это связано с тем, что создание чрезмерно большого запаса по нагрузке уменьшает эффективность применения изделий. Соблюдение указанных требований позволяет выбрать оптимальную предельно допустимую нагрузку. Предельно допустимые нагрузки для вновь разрабатываемых изделий могут быть установлены в ТУ на основе анализа результатов испытаний и эксплуатации ранее освоенных и новых аналогичных изделий, а также сконструированных специально для этих целей упрощенных тестовых моделей изделий в целом или отдельных их

элементов. Весь комплекс работ по выбору предельно допустимых нагрузок ЭС в процессе их эксплуатации и испытаний можно изобразить в виде схемы, представленной на рисунке 1.15.

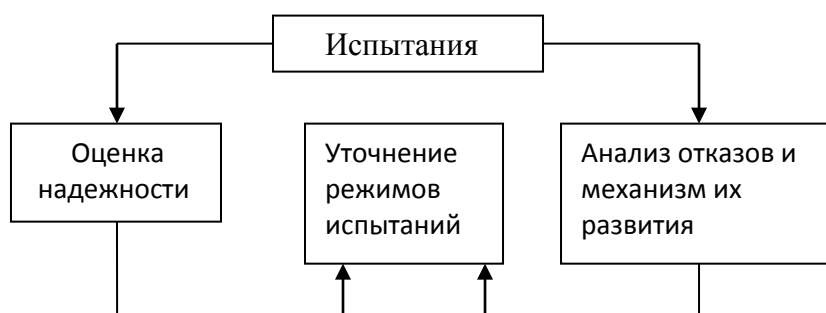


Рисунок 1.15 – Комплекс работ по установлению предельно допустимых нагрузок при эксплуатации и испытаниях ЭС

Обеспечение заданных показателей надежности ЭС в течение гарантируемого времени зависит не только от правильно выбранной предельно допустимой нагрузки, но и в неменьшей степени от правильного выбора допустимых пределов изменения параметров изделий, т. е. связано с причинами второй группы, определяющими неадекватность испытаний условиям эксплуатации. Контроль параметров изделий до испытаний производят, как правило, по так называемым производственным цеховым нормам, устанавливаемым в технологической документации для производства в зависимости от погрешностей контрольно-измерительной аппаратуры. Эти нормы являются более жесткими, чем нормы, устанавливаемые в ЧТУ. Запас по нормам, который часто называют производственным запасом, необходим, чтобы исключить поставку изделий, не соответствующих установленным в ЧТУ нормам. Поэтому контрольно-измерительная аппаратура, используемая при производстве изделий, должна обладать не большей погрешностью измерений, чем контрольно-измерительная аппаратура, применяемая при сдаче готовой продукции. В противном случае фактически негодные изделия будут пропущены как годные и откажут при проведении приемосдаточных испытаний.

Нормы на параметры качества зависят не только от погрешностей контрольно-измерительной аппаратуры. В производстве всегда наблюдается технологический разброс значений параметров, обусловленный особенностями технологии производства и прежде всего разбросом характеристик исходных материалов и технологического оборудования. Кроме того, как уже указывалось, изменение значений параметров изделий во времени происходит в связи с протекающими в них

физико-химическими процессами, вызываемыми действием нагрузки и окружающей среды (таблица 1.7). Поэтому для обеспечения заданного показателя надежности изготовитель при сдаче продукции потребителю вынужден устанавливать нормы – условные критерии – на параметры изделий, отличающиеся от реальных значений в сторону расширения пределов. Нормативный запас зависит от скорости изменения параметров во времени при воздействии на изделия внешних факторов. При этом очевидно, что чем шире установленные допустимые пределы изменения параметров, тем ниже вероятность выхода параметров за эти пределы в течение заданного времени, а следовательно, выше вероятность безотказной работы изделия. Однако, как и при установлении предельно допустимой нагрузки, не следует выбирать чрезмерно большие запасы по параметрам, так как показатель надежности при этом практически не меняется, а технические характеристики изделия и объекта, в котором оно используется, ухудшаются.

Запас по параметрам, установленный в зависимости от их технологического разброса и конструктивных особенностей изделия, называют конструктивно-технологическим запасом. Он выражается безразмерной величиной – коэффициентом конструктивно-технологического запаса для нижнего и верхнего контрольных пределов:

$$K_{3H} = (x_H - x_{HTY}) / (M[X] - x_H),$$

$$K_{3B} = (x_{BTY} - x_B) / (x_B - M[X]),$$

где x_H и x_B – наименьшее и наибольшее значения параметра в реальном распределении; x_{HTY} и x_{BTY} – нижнее и верхнее значения норм, оговоренных в ТУ; $M[X]$ – среднее значение параметра, заданное НТД.

При симметричном распределении параметров изделий знаменатели приведенных выражений, характеризующих нестабильность ТП, равны и значение K_3 в обоих случаях определяется выбранными конструктивно-технологическими запасами по x_H и x_B .

При оценке результатов испытаний с помощью условных критериев можно не рассматривать все параметры изделия. Достаточно выбрать для наблюдения наиболее информативные из них. Параметры изделия, по которым его считают годным или условно отказавшим, называют параметрами – критериями годности (ПКГ). Допустимые изменения

значений ПКГ ограничивают односторонними или двусторонними пределами. При этом минимальное и максимальное значения ПКГ могут быть как абсолютными, так и относительными (отношение конечных значений параметров, полученных в результате испытаний, к начальным значениям до начала испытаний). Однако, как уже отмечалось, целью испытаний является оценка надежности изделий, характеризующейся изменением ПКГ во времени. В случае выбора абсолютных значений границ измерения ПКГ не учитывается характер изменения этих параметров в пределах данных границ. Абсолютные значения границ допустимых изменений контролируемых параметров применяют при установлении значений ПКГ, рекомендуемых потребителю. Относительными значениями границ изменения ПКГ предпочтительнее пользоваться изготовителю при испытании изделий. Однако различный подход к установлению допустимых границ изменения значений ПКГ для изготовителя и потребителя приводит к различию значений показателей надежности при испытаниях и эксплуатации ЭС.

Причины третьей группы, определяющие неадекватность испытаний ЭС условиям их эксплуатации, связаны с различием режимов работы изделий при испытаниях и эксплуатации. Некоторые изделия при эксплуатации в течение длительного времени находятся в неработающем состоянии. Установлено, что именно в этот период происходит от 20 до 60% их отказов. Для физических: структур МДМ, МДП и др., являющихся составной частью ИС, устойчивость к возникновению внезапных отказов повышается при включении электрической нагрузки.

С другой стороны, к довольно большому числу отказов приводит эксплуатация ЭС в циклическом режиме, связанном со сравнительно частыми их включениями и выключениями. Это объясняется тем, что во время переходных процессов, обусловленных включениями/выключениями ЭС, в них возникают экстратоки и перенапряжения, значения которых часто намного превышают (хотя бы кратковременно) допустимые по ТУ. Иногда для упрощения испытаний ЭС, предназначенные для эксплуатации в циклическом режиме, испытывают в непрерывном. Однако, как показывает практика, надежность ЭС, работающих при большой частоте включений/выключений (более одного включения/выключения в час), может быть во много раз ниже надежности изделий, работающих непрерывно в течение установленного времени, например 10 ч. в сутки.

При испытаниях ЭС на них должны воздействовать те же факторы, что и при эксплуатации. Одновременно нужно исключить возможность повреждения испытываемых изделий из-за воздействий, не характерных для условий их эксплуатации. Так, при подготовке к испытаниям некоторых типов изделий (например, точных гироскопов) их приходится устанавливать на жесткие котировочные плиты, жесткие платформы и т. п. Если в изделии имеются детали, повреждающиеся при ударных перегрузках, то на установочные штифты следует надевать защитные амортизаторы, предотвращающие жесткий удар и значительные ударные перегрузки (например, при опускании изделия на котировочную плиту с высоты 3...5 мм). Такие амортизаторы являются технологическими – их зажимают, и во время работы изделия они не действуют.

Чтобы уменьшить расхождение значений показателей надежности на стадиях испытаний и эксплуатации ЭС, проводят организационные и технические мероприятия. Организационные мероприятия включают установление единообразной процедуры сбора данных об отказах и получение возможно более полной информации о них при испытаниях и эксплуатации ЭС, использование коррелированных критериев отказов при испытаниях и эксплуатации, а также одинаковых промежутков времени, в течение которых фиксируется число отказов. Технические меры связаны с совершенствованием методов и программ испытаний на надежность, модернизацией имеющихся и разработкой новых устройств для испытаний.

Проблема снижения трудоемкости испытаний, с которой прежде всего связано экспериментальное подтверждение высоких показателей надежности изделий, – одна из важнейших. В самом деле, для того чтобы определить или подтвердить требуемое для современных изделий значение $\lambda \cong 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, необходимо испытывать 1000 изделий в течение 10 лет. Не только трудоемкость, но и стоимость таких испытаний непомерно велика, а полученная информация о надежности ЭС из-за длительного времени испытаний теряет ценность. Решение проблемы идет в настоящее время по трем направлениям:

- 1) развитие математических, физических и физикостатистических методов прогнозирования надежности ЭС;
- 2) автоматизация испытаний ЭС с широким применением вычислительной и прежде всего микропроцессорной техники;
- 3) развитие методов неразрушающего контроля.

В первом направлении наиболее интенсивно развиваются физико-статистические методы прогнозирования надежности, основанные на

тщательном изучении физико-химических процессов, протекающих в реальных структурах. Методика испытаний ЭС в этом случае предусматривает ускорения протекания физико-химических процессов, обуславливающих деградацию параметров изделия, а следовательно, сокращение промежутка времени до отказа. Испытания проводят при повышенных нагрузках в форсированных режимах работы ЭС и называют ускоренными.

Второе направление обеспечивает снижение стоимости испытаний ЭС с одновременным повышением достоверности их результатов и связано с широким применением вычислительной техники для автоматизации испытаний, что наиболее эффективно при крупносерийной или массовом производстве.

Третье направление позволяет повысить точность оценки качества и надежности ЭС и предусматривает развитие методов неразрушающего контроля. Диагностический характер этих методов при их технической реализации дает возможность, с одной стороны, отказаться от статистических методов оценки надежности, а с другой – оперативно и с высокой достоверностью осуществлять выборочную или сплошную оценку качества и надежности материалов, полуфабрикатов и готовых изделий. Методы неразрушающего контроля наиболее перспективны и могут стать основой для прогнозирования надежности выпускаемых ЭС при создании автоматизированных системы управления ТП и качеством.

В заключение следует отметить, что проблема повышения надежности и качества ЭС перерастает в экономическую. Существует вполне определенная функциональная зависимость между требуемыми количественными показателями надежности, издержками производства и планом. Если, например, путем тщательного контроля добиться чрезмерно высокой точности изготовления изделий, то несоразмерно возрастет их себестоимость. Другим экстремальным случаем является 100%-й брак в производстве. Между этими крайними случаями лежит так называемый оптимальный вариант, приводящий к наиболее высокому экономическому эффекту. Характерные зависимости расходов на обеспечение качества ЭС от вероятности их безотказной работы приведены на рисунке 1.16, из которого видно, что оптимальными количественными показателями надежности являются наиболее экономически выгодные показатели, соответствующие минимальной сумме затрат при производстве и эксплуатации ЭС. Однако в тех случаях, когда надежность имеет решающее значение, экономические соображения отходят на второй план.

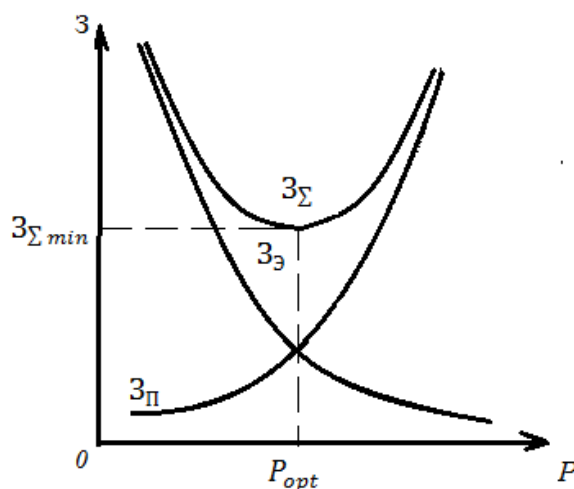


Рисунок 1.16 – Зависимость расходов на обеспечение качества ЭС от вероятности их безотказной работы:

- затраты на производство;
- затраты на эксплуатацию;
- суммарные затраты

Контрольные вопросы

1. На каких этапах «жизненного» цикла ЭС закладывается их качество?
2. Назовите существующие виды контроля при изготовлении ЭС. Какова роль испытаний в обеспечении качества ЭС?
3. Какие организационные требования обеспечивают нормальное взаимодействие между изготовителем, потребителем и испытателем ЭС?
4. Как классифицируют ЭС в зависимости от условий их эксплуатации?
5. Что понимают под естественными воздействиями на ЭС и воздействиями на ЭС объекта?
6. Чем обусловлены внутренние воздействия на ЭС?
7. В чем отличие между объективными и субъективными факторами, воздействующими на ЭС?
8. Под влиянием каких процессов в атмосфере происходит формирование климата?
9. Какие климатические факторы представляют для ЭС наибольшую опасность, и каковы методы защиты ЭС от воздействия этих факторов?
10. Назовите источники и виды биоповреждений.
11. Назовите основные космические факторы, влияющие на ЭС.
12. Назовите наиболее опасные для ЭС механические воздействия.

13. В чем специфика потенциально ненадежных изделий и как они могут быть выявлены?
14. Какими причинами обусловлено различие значений показателей надежности при испытаниях и эксплуатации ЭС?
15. Назовите причины неадекватности условий испытаний и условий эксплуатации ЭС. Каковы пути решения этой проблемы?
16. Каковы пути снижения трудоемкости испытаний?
17. В чем заключается экономическая проблема обеспечения и оценки надежности ЭС?

Глава 2

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

2.1. Некоторые понятия теории вероятностей, применяемые при испытаниях ЭС

В процессе испытаний ЭС приходится иметь дело со случайными событиями. Случайным событием называется такое событие, которое может произойти или не произойти при определенном комплексе условий, тесно связанных с возможностью появления данного события. Так, время работы до отказа каждого отказавшего образца, поставленного на испытание, случайно. Объясняется это прежде всего тем, что при изготовлении изделий практически невозможно строго выдержать технологический режим и однородность физико-химической структуры применяемых материалов. Поэтому случайные колебания параметров исходного сырья, режимов работы, используемого технологического оборудования и других факторов, существенных для производства, влияют на продолжительность безотказной работы ЭС.

Это приводит к тому, что за рассматриваемый конечный промежуток времени отказ каждого конкретного образца может произойти или не произойти, т. е. возникновение отказов испытываемого изделия в разные промежутки времени – случайное событие. Изучением случайных событий занимается теория вероятностей. Рассмотрим понятия теории вероятностей, применяемые при испытаниях ЭС.

Предположим, что сдается партия изделий, состоящая из N образцов. Заранее известно, что в ней имеется D дефектных изделий. Вероятность извлечения из этой партии дефектного образца

$$Q = D / N. \quad (2.1)$$

Вероятность извлечения из N образцов одного бездефектного

$$P = (N - D) / N = 1 - Q. \quad (2.2)$$

Очевидно, что значения Q и P для данной партии изделий постоянны и определяются числом D дефектных изделий в партии. Величины Q и P называют генеральными характеристиками.

Если в сдаваемой партии дефектные изделия отсутствуют ($D = 0$), то, согласно (2.2), вероятность извлечения бездефектного изделия $P = 1$. Такое событие называют достоверным. Если же партия состоит только из

дефектных изделий ($N = D$), то, согласно (2.2), вероятность извлечения бездефектного изделия $P = 0$. Такое событие в противоположность достоверному называют невозможным. Все остальные значения вероятности извлечения бездефектного изделия лежат в пределах от 0 до 1.

На практике чаще приходится иметь дело с так называемыми «практически невозможными» и «практически достоверными» событиями. Практически невозможным событием называется событие, вероятность которого близка нулю, а практически достоверным – событие, вероятность которого близка единице. Вопрос о том, насколько мала должна быть вероятность события, чтобы его можно было считать практически невозможным, выходит за рамки математической теории и в каждом отдельном случае решается в соответствии с той важностью, которую имеет желаемый результат опыта. Например, если вероятность отказа ИС для телевизора составляет 0,01 за 10 лет, т. е. из 100 ИС за 10 лет работы откажет только одна, то можно считать отказ ИС практически невозможным событием. Если, однако, вероятность отказа ИС, равная 0,01, связана с риском для жизни человека, то такой отказ нельзя считать практически невозможным событием и следует добиваться большей надежности ИС.

Предположим, что методом случайного отбора из сдаваемой партии изделий составлена выборка (часть изделий, отобранных из общей совокупности для получения информации о всей массе изделий) объемом n . После проверки выяснилось, что из n изделий в выборке d изделий оказались дефектными. Доля дефектных изделий в выборке, взятой из партии,

$$q = d / n \quad (2.3)$$

называется статистической вероятностью дефектных изделий в выборке.

Статистическая вероятность бездефектных изделий в выборке

$$p = (n - d) / n = 1 - q. \quad (2.4)$$

Величины q и p называют выборочными характеристиками. Очевидно, что значения их случайны. Поэтому сами величины q и p являются случайными, т. е. некоторыми переменными величинами, принимающими в зависимости от случая те или иные значения с определенными вероятностями.

С ростом числа изделий в выборке статистические вероятности q и p все более теряют случайный характер. Случайные обстоятельства, оказывающие существенное влияние при малых выборках, при увеличении объема последних взаимопогашаются, а значения выборочных характеристик q и p приближаются к значениям генеральных характеристик Q и P .

Изучение случайных событий предполагает ознакомление со статистическим рядом и его характеристиками. Предположим, что в партии изделий производят замер какого-либо параметра, конкретное значение x_i которого для каждого изделия является случайным. В результате замеров получают совокупность случайных значений параметров. Если расположить эти значения в возрастающем порядке, то образуется упорядоченный, или ранжированный, ряд случайных значений x_i . В таком ряду повторяющиеся два (или более) раза значения x_i объединяют. Число повторяющихся значений обозначают через m_i и называют абсолютной частотой или статистическим весом, а сам ряд значений случайной величины – статистическим рядом.

Статистический ряд имеет две важнейшие характеристики, которые в сжатой форме отражают результаты измерений. Одна из них описывает среднее положение наблюдаемых значений, а другая – отклонения отдельных значений от среднего. Среднее положение наблюдаемых значений в ряду характеризуется с помощью среднего арифметического и медианы. Для простой статистической совокупности, в которой каждое значение случайной величины встречается только один раз, среднее арифметическое

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.5)$$

Для статистического ряда, в котором каждому значению x_i случайной величины соответствует некоторая частота m_i , среднее арифметическое

$$\bar{x} = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2.6)$$

В этом случае среднее арифметическое $\bar{x}$ называют средним взвешенным значением случайной величины. Следует иметь в виду, что величина $\bar{x}$ только тогда является обобщающей характеристикой, когда

она применяется к однородной совокупности наблюдаемых значений (совокупности значений одной и той же случайной величины).

Медианой случайной величины X называют такое ее значение Me , которое приходится на середину упорядоченного ряда, т.е. медиана делит упорядоченный ряд на две равные по числу случайных значений группы. При четном числе измерений медиана равна среднему арифметическому двух соседних значений, расположенных в середине ряда; при нечетном числе измерений – значению случайной величины, занимающему срединное положение в ряду. Рассмотренные характеристики ($\bar{x}$ и Me) не учитывают рассеивание около них отдельных значений случайной величины. Для описания рассеивания значений случайных величин применяют ряд характеристик. Простейшей из них является размах $R = x_{max} + x_{min}$, где x_{max} и x_{min} – максимальное и минимальное значения случайной величины. Размах служит лишь для приблизительной оценки рассеивания значений случайной величины.

В качестве меры колебания значений случайной величины в статистическом ряду наиболее часто применяют средний квадрат отклонения, который называют выборочной дисперсией. Выборочная дисперсия

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2.7)$$

При наличии соответствующих частот m_i вычисляется взвешенная выборочная дисперсия:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 m_i}{\sum_{i=1}^n m_i - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 m_i}{n-1}. \quad (2.8)$$

Как видно из формул (2.7) и (2.8), дисперсия имеет равномерность квадрата случайной величины.

Для наглядной характеристики рассеивания служит среднее квадратическое отклонение, размерность которого совпадает с размерностью измеряемой случайной величины:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Взвешенное среднее квадратическое отклонение

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 m_i}.$$

Для характеристики рассеивания случайной величины используют также коэффициент вариации V , равный отношению ее среднего квадратического отклонения к среднему арифметическому значению и выражаемый в процентах или долях единицы:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100.$$

Рассмотренные характеристики являются выборочными, так как они получены на основании выборки, сделанной из генеральной совокупности. Для характеристики среднего положения случайной величины в генеральной совокупности служит математическое ожидание случайной величины ($M[X]$), которое иногда называют генеральным средним арифметическим. Оно может быть получено следующим образом. Пусть случайная величина X принимает дискретные значения $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ с соответствующими вероятностями $p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n$. Тогда

$$M[X] = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}.$$

Учитывая, что $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, можно записать

$$M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i.$$

Следует заметить, что если выборочное среднее арифметическое значение [см. (2.5), (2.6)] всегда содержит элемент случайности, то математическое ожидание – величина постоянная для данной генеральной совокупности (например, сдаваемой партии изделий).

Дисперсия случайной величины X в генеральной совокупности

$$\sigma^2[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{x_i - M[X]\}^2$$

для случая, когда значения X в генеральной совокупности не повторяются,
и

$$\sigma^2[X] = \frac{\sum_{i=1}^n \{x_i - M[X]\}^2 m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

при повторяющихся значениях X .

Случайные величины могут быть дискретными или непрерывными. Соответственно и распределения их вероятностей описываются законами распределения дискретных или непрерывных случайных величин. Пример дискретной случайной величины – число изделий в выборке, параметры которых не отвечают тем или иным требованиям. Это число дефектных изделий может быть только целым. Пример непрерывной случайной величины – время работы изделия до отказа, которое может принимать как целые, так и дробные значения. Распределение вероятностей появления дискретных случайных величин чаще всего описывается гипергеометрическим или биномиальным законом или законом Пуассона; распределение вероятностей появления непрерывных случайных величин – экспоненциальным или гауссовским законом, а также законом Вейбулла.

При проведении испытаний ЭС и обработке их результатов часто встречаются с композицией и суперпозицией распределений. Остановимся на этих понятиях более подробно. Пусть имеется ряд независимых случайных величин $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ с плотностями вероятностей ⁵ $f(X_1), f(X_2), f(X_3), \dots, f(X_n)$. Просуммировав указанные величины, получим новую случайную величину $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_n$, с плотностью вероятности $f(Y)$. Закон распределения случайной величины Y называется композицией законов распределения случайных величин $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. Рассмотрим общие и частные свойства композиции распределений.

Общими называют также свойства композиций распределений, которые не зависят от вида исходных законов распределения, составляющих композицию. Это следующие свойства.

1. Математическое ожидание случайной величины Y равно арифметической сумме математических ожиданий случайных величин, законы распределения которых составляют композицию распределений:

$$M[Y] = M[X_1] + M[X_2] + M[X_3] + \dots + M[X_n]$$

2. Дисперсия случайной величины Y равна арифметической сумме дисперсий случайных величин, законы распределения которых составляют композицию распределений: $\sigma^2[Y] = \sigma^2[X_1] + \sigma^2[X_2] + \sigma^2[X_3] + \dots + \sigma^2[X_n]$.

⁵ Плотность вероятности представляет отношение вероятности попадания значений случайной величины в заданный интервал к длине этого интервала.

Из этих свойств можно вывести два следствия:

- 1) с ростом числа n изделий в выборке коэффициент вариации убывает, а следовательно, мера точности возрастает пропорционально
- 2) если имеются две (или более) случайные величины с резко отличными средними квадратическими отклонениями, то в композиции их распределений случайная величина с меньшей дисперсией практически не оказывает влияния на суммарную дисперсию.

Рассмотрим частные свойства композиции распределений, т. е. такие свойства, которые зависят от конкретного вида исходных законов распределения, составляющих композицию. Предположим, что случайные величины X_1 и X_2 имеют распределения, описываемые экспоненциальными законами с одним и тем же параметром λ : $M[X_1] = M[X_2] = 1/\lambda$; $\sigma[X_1] = \sigma[X_2] = 1/\lambda$.

Посмотрим, будет ли композиция этих законов также описываться экспоненциальным законом распределения. Согласно первому общему свойству для $Y = X_1 + X_2$,

$$\begin{aligned}M[Y] &= M[X_1] + M[X_2] = 1/\lambda + 1/\lambda = 2/\lambda \\ \sigma^2[Y] &= \sigma^2[X_1] + \sigma^2[X_2] = 1/\lambda^2 + 1/\lambda^2 = 2/\lambda^2\end{aligned}$$

Тогда коэффициент вариации

$$V[Y] = \sigma[Y]/M[Y] = \sqrt{2}/2$$

Таким образом, в результате композиции двух экспоненциальных распределений новое распределение не подчиняется экспоненциальному закону, при котором коэффициент вариации всегда равен единице.

Если взять два распределения Вейбулла, то в композиции также не получится распределение Вейбулла. То же можно сказать и о других законах распределения, за исключением законов Пуассона и Гаусса. При большом числе распределений Пуассона их композиция имеет распределение, близкое гауссовскому, если значение математического ожидания более 20. Для большого числа биномиальных распределений распределение композиции также очень близко к гауссовскому. Следовательно, при большом числе распределений любого вида распределение их композиции близко к гауссовскому. Более того, в результате композиции большого числа ($n \rightarrow \infty$) неодинаковых распределений независимых случайных величин с различными, но не очень сильно отличающимися друг от друга дисперсиями и математическими ожиданиями получается также гауссовское распределение. Это важное положение теории вероятностей называется центральной предельной теоремой, которая определяет особую роль гауссовского распределения в теории вероятностей.

Композиция распределения встречается на практике при обобщении результатов испытаний нескольких выборок, взятых из различных партий изделий.

Предположим, что на испытания предъявляется партия, состоящая из N изделий. Из них для N_1 изделий плотность вероятности случайной величины X составляет $f_1(X)$, а для N_2 изделий – $f_2(X)$. В этом случае получается суперпозиция распределений $f_1(X)$ и $f_2(X)$:

$$f(Y) = \omega_1 f_1(X) + \omega_2 f_2(X),$$

где $\omega_1 = N_1 / N$; $\omega_2 = N_2 / N$.

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины Y в суперпозиции распределений определяются выражениями

$$M[Y] = \omega_1 M_1[X] + \omega_2 M_2[X],$$
$$\sigma^2[Y] = \omega_1 \sigma_1^2[X] + \omega_2 \sigma_2^2[X] + \omega_1 \omega_2 \{M_1[X] - M_2[X]\}^2.$$

Суперпозиция распределений может иметь место, когда партию изделий, предъявляемых заказчику, комплектуют из однотипных изделий, изготовленных из различных партий сырья и полуфабрикатов или на различных технологических линиях.

2.2. Выборочный метод испытаний. Основные характеристики

Большинство методов испытаний ЭС являются либо разрушающими, либо значительно сокращающими технический ресурс⁶ изделий. Поэтому наиболее широкое применение в практике испытаний получил выборочный метод, который позволяет судить о всей генеральной совокупности изделий по взятой из нее выборке. Если изделия, входящие в выборку, в полной мере отражают характер и структуру генеральной совокупности, то такая выборка называется представительной или репрезентативной.

Выборки классифицируют по ряду признаков, например по способу образования (повторные и неповторные), по преднамеренности отбора (преднамеренные и случайные), по отношению ко времени образования (единовременные и текущие), по целевому назначению (расслоенные и общепроизводственные) и т. д.

⁶ Технический ресурс — наработка ЭС от начала эксплуатации до наступления предельного состояния. Предельное — это такое состояние ЭС, при котором дальнейшая их эксплуатация должна быть прекращена из-за ухода заданных параметров за установленные нормы или снижения показателей качества ниже допустимых. Критерии предельного состояния устанавливаются НТД.

Выборочные характеристики, с помощью которых делают статистические выводы относительно генеральной совокупности, называют оценками генеральных характеристик. Так, при испытании ЭС с помощью выборочной характеристики q оценивают генеральную характеристику Q для партии изделий, из которых взята данная выборка, а выборочные среднее арифметическое $\bar{x}$ и среднее квадратическое отклонение s служат оценками математического ожидания $M[X]$ и дисперсии σ .

Чтобы дать представление о точности и надежности оценки числа D дефектных изделий в генеральной совокупности с помощью полученного значения числа d дефектных изделий в выборке, пользуются так называемыми *доверительными границами*. Вероятность нахождения оцениваемого параметра в доверительных границах называют достоверностью. Достоверность P является количественной характеристикой практически достоверного события и характеризует степень нашего доверия к анализируемым событиям. Обычно достоверность берется близкой единице: 0,9; 0,95; 0,99. Достоверность P называют односторонней, если она отражает степень нашего доверия к тому, что $Q \geq Q_H$ или $Q \leq Q_B$, где Q_H и Q_B – нижняя и верхняя доверительные границы. Двусторонняя достоверность P^* отражает степень нашего доверия к тому, что $Q_H \leq Q \leq Q_B$. Она несколько меньше односторонней: $P^{*'} = 2P^* - 1$.

На практике для расчета доверительных границ обычно пользуются специальной таблицей (таблица П.1), в которой приведены коэффициенты K_H и K_B для расчета доверительных границ Q_B и Q_H с двусторонней достоверностью 0,9 и коэффициент K_B для расчета доверительной границы Q_B с односторонней достоверностью 0,95 в зависимости от числа дефектных изделий в выборке.

Значения Q_B и Q_H определяют соотношениями

$$Q_B = K_B / n, \quad (2.9)$$

$$Q_H = K_H / n. \quad (2.10)$$

Пример. В выборке объемом $n=100$ не обнаружено дефектных изделий. Определить с односторонней достоверностью $P = 0,95$ число дефектных изделий в партии, из которой взята данная выборка.

Из таблицы П.1 находим $K_B = 3$. В соответствии с (2.9) определяем верхнюю границу для $Q: Q_B = 0,03$. т. е. в партии объемом, например. 10000 шт. число дефектных изделий не более 300, что мы утверждаем с достоверностью 0,95.

Одним из основных вопросов при проведении испытаний ЭС является *определение объема выборки*. Слишком большой ее объем может

привести к недопустимым потерям времени и средств. Однако если выборка и время испытаний слишком малы, то могут возникнуть сомнения относительно достоверности полученных результатов. Оптимальными были бы такие выборка и время испытаний, которые бы позволили добиться достоверных результатов при максимальной оперативности их получения и минимальной стоимости испытаний.

Обычно при подготовке НТД поставщик по согласованию с заказчиком заранее устанавливает число дефектных изделий ($d_{\text{доп}}$), которое допускается в выборке при приемке партии. Это число устанавливается исходя из заданного значения Q_B . Если окажется, что $d > d_{\text{доп}}$, то партия изделий заказчиком не принимается, так как она не удовлетворяет требованиям на надежность, которые оговариваются в ТУ на эти изделия. Наименьшее число отказавших изделий в испытываемой выборке, при котором результаты испытаний считаются отрицательными, называют браковочным числом C' . Наибольшее число отказавших изделий в испытываемой выборке, при котором результаты испытаний считаются положительными, называют приемочным числом C .

Кривая зависимости вероятности $P_{\text{оп}}$ приемки партии изделий по результатам испытания выборки объемом n от заданной вероятности Q отказа изделий в партии, из которой взята выборка, называется оперативной характеристикой плана контроля надежности изделий.

Пусть для контролируемой партии изделий вероятность отказов равна Q_1 . По оперативной кривой (рисунок 2.1, а) находим вероятность приемки такой партии. Предположим, что она составляет 0,9. Это означает, что даже в том случае, когда число дефектных изделий в каждой предъявляемой партии является допустимым, следует ожидать, что 10 % партий будет забраковано по результатам испытания выборок, взятых из этих партий методом случайного отбора.

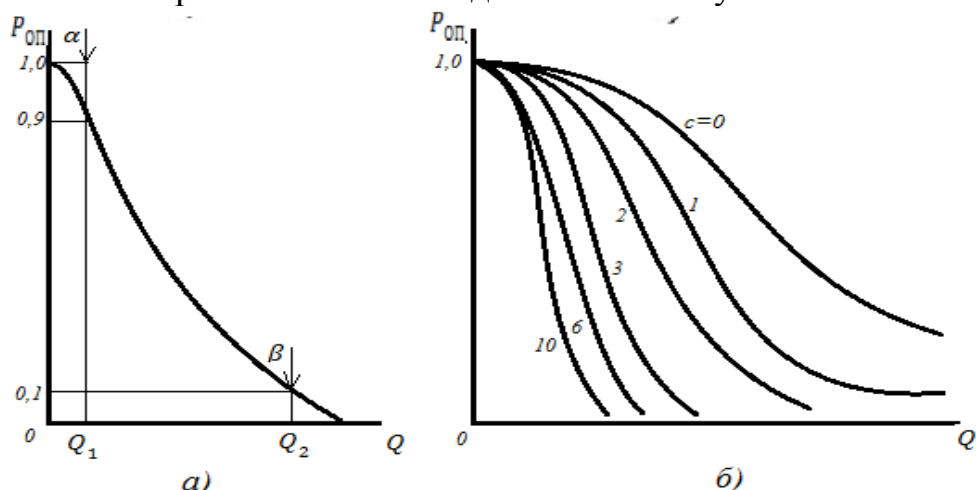


Рисунок 2.1 – Оперативные характеристики, построенные по результатам выборочного контроля при постоянных n и $C(a)$ и для нескольких значений C при постоянном $n(b)$

Вероятность забракования партии изделий (даже если эта партия соответствует заданным требованиям по надежности) вследствие плохой (пессимистической) выборки представляет риск изготовителя α . В рассмотренном примере $\alpha = 10\%$.

Предположим теперь, что партия изделий имеет вероятность отказов Q_2 . По оперативной кривой вероятность приемки такой партии равна 0,1. Это означает, что если каждая из предъявляемых партий содержит дефектных изделий даже больше, чем это допустимо по ТУ, то 10 % всех партий будет принято заказчиком как удовлетворяющие требованиям по надежности. Вероятность приемки партии изделий (даже если число дефектных изделий в ней превышает допустимое по ТУ) вследствие хорошей (оптимистической) выборки представляет собой риск заказчика (β). В данном примере $\beta = 10\%$.

При выборочном контроле надежности партии изделий наихудший показатель надежности Q_2 , соответствующий риску β заказчика, называют браковочным (гарантированным) уровнем показателя надежности. Аналогично, значение показателя надежности изделий, вероятность забракования которых равна риску изготовителя (или вероятность приемки равна $1 - \alpha$), называют приемочным (приемлемым) уровнем Q_1 показателя надежности. Оба уровня могут быть определены по оперативной характеристике (рисунок 2.1, а) для заданных значений риска заказчика и изготовителя.

На рисунке 2.1, б приведены оперативные характеристики для нескольких значений приемочного числа C . Как видно из рисунка, чем больше C , тем оперативная кривая круче (меньше различие между браковочным и приемочным уровнями показателя надежности изделий, и, наоборот, чем меньше C , тем она положе (больше различие между браковочным и приемочным уровнями).

Следует отметить, что выборочный контроль включает некоторый риск, связанный с принятием некачественной или браковкой качественной продукции. Однако, поскольку этот риск является неизбежным, выборочный метод контроля вполне оправдан.

2.3. Классификация испытаний

Все испытания ЭС классифицируют (рисунок 2.2) по методам проведения, назначению, этапам проектирования, изготовления и выпуска, виду испытаний готовой продукции, продолжительности, уровню проведения, виду воздействия, определяемым характеристикам объекта.

Методы испытаний подразделяют на две большие группы (рисунок 2.3): 1) физические испытания реальных ЭС или их макетов; 2) испытания

Классификация испытаний								
По методам проведения	По назначению	По этапам проектирования, изготовления и выпуска	По виду испытаний готовой продукции	По продолжительности	По уровню проведения	По виду воздействия	По результату воздействия	По определяемым характеристикам объекта
физические	исследовательские	доводочные	Квалификационные	Нормальные	Государственные	механические	неразрушающие	на надёжность
с использованием моделей	определяющие	предварительные	Предъявительские	Ускоренные	Межведомственные	климатические	разрушающие	граничные
	сравнительные	приёмочные	Приёмосдаточные	Сокращённые	Ведомственные	тепловые	на стойкость	технологические
	контрольные		Периодические			радиационные	на прочность	
			Инспекционные			электрические	на устойчивость	
			типовые			электромагнитные		
			Аттестационные			магнитные		
			Сертификационные			химические		
						биологические		

Рисунок 2.2 – Классификация испытаний ЭС

с использованием моделей. *Физические испытания* могут проводиться как при внешних воздействующих факторах (ВВФ), создаваемых искусственным путем с помощью испытательных стендов (стендовые испытания) или специальных методов и средств, применяемых в лабораторных условиях (лабораторные испытания), так и при естественных ВВФ (полигонные и натурные испытания).

Лабораторные и стендовые испытания ЭС отличаются от реальной эксплуатации тем, что при их проведении пока еще не представляется возможным моделировать случайную совокупность всех внешних воздействий одновременно, как при реальной эксплуатации. Обычно при лабораторных и стендовых испытаниях ЭС подвергают воздействию одной или нескольких определенных нагрузок. Это приводит к результатам, несколько отличающимся от получаемых при реальной эксплуатации. Поэтому при исследовании влияния ВВФ наряду с лабораторными и стендовыми испытаниями проводят также испытания ЭС в естественных условиях.

Методы испытаний	
Физические испытания реальных ЭС	С использованием моделей
Лабораторные	Физическое моделирование
Стендовые	Математическое моделирование
Полигонные	Статистические
Натурные	Граничные
Эксплуатационные	Матричные

В зависимости от условий и места проведения таких испытаний различают полигонные и натурные испытания ЭС. Полигонные испытания ЭС осуществляют на специально оборудованном полигоне при воздействии внешних климатических факторов. При этом испытания ЭС, предназначенных для эксплуатации и хранения только в определенных климатических районах, проводят на полигонах, расположенных в пунктах с соответствующим климатом.

При проведении натурных испытаний ЭС предполагается выполнение трех основных условий:

- 1) испытаниям подвергаются ЭС, а не их модели или составные части;
- 2) испытания проводятся в условиях и при воздействиях на ЭС, соответствующих условиям и воздействиям при эксплуатации;

3) определяемые характеристики объекта испытаний измеряются непосредственно, без использования аналитических зависимостей, отражающих физическую структуру объекта испытаний и его составных частей. При этом допускается применять математический аппарат для статистической обработки экспериментальных данных.

Пример 1. На испытания представлена радиолокационная станция (РЛС) кругового обзора. Цель испытаний – определить дальность обнаружения радиолокационной станцией летательного аппарата заданного типа с заданной отражающей поверхностью. В процессе испытаний летательный аппарат выполняет полеты по заранее выбранным маршрутам. Дальность обнаружения РЛС находят непосредственно (координаты РЛС известны заранее, координаты летательного аппарата известны для любого момента времени). Момент обнаружения аппарата определяется в процессе испытаний.

В данном случае все три приведенные условия выполняются, т. е. испытания РЛС являются натурными. Испытания останутся натурными, если вместо летательного аппарата будет использовано некоторое физическое тело с параметрами движения, близкими параметрам летательного аппарата заданного типа с заданной отражающей поверхностью.

Пример 2. Проводятся испытания РЛС кругового обзора. В процессе испытаний измеряются непосредственно чувствительность приемного тракта РЛС, мощность передатчика, частота излучаемого сигнала и т. д. По результатам измерений с помощью формулы радиолокации определяют дальность действия РЛС.

В этом случае не выполняется третье условие, так как фактически используется математическая модель – формула радиолокации. Поэтому рассмотренные испытания РЛС не являются натурными.

Цель полигонных и натурных испытаний – исследование комплексного влияния естественно воздействующих факторов на изменение параметров, свойств и механизмов отказов ЭС при их эксплуатации и хранении. Эти испытания позволяют: исследовать характер реальных физико-химических процессов, протекающих в материалах и элементах, испытываемых ЭС при воздействии естественных факторов; уточнять данные, получаемые при испытаниях ЭС под воздействием внешних факторов, создаваемых искусственным путем, а также нормы на допустимые изменения параметров – критериев годности.

По результатам полигонных и натурных испытаний разрабатывают рекомендации по защите ЭС от влияния внешних факторов.

Спецификой натурных испытаний являются их продолжительность, сложность и высокая стоимость. Эти испытания требуют четкой организации и оптимального планирования. Для ограничения объема натурных испытаний программа их проведения должна базироваться на анализе результатов эксплуатации, лабораторных и стендовых испытаниях, а также требований, предъявляемых к ЭС. Это позволяет проводить испытания объекта только в тех естественных условиях, в которых влияние дестабилизирующих факторов наиболее значительно. Условия проведения натурных испытаний ЭС должны максимально приближаться к реальным условиям эксплуатации, для которых характерно чередование рабочих и нерабочих периодов. Поэтому проводят натурные испытания двух видов: под электрической нагрузкой (непрерывной или циклической) – для определения надежности ЭС при функционировании; без электрической нагрузки – для определения надежности ЭС при хранении.

Натурные испытания достаточно проводить только с типичными «представителями» групп ЭС (ЭС, имеющих близкие конструктивно-технологические решения), а затем результаты испытаний распространять на всю группу. Это уменьшает объем и стоимость испытаний и во многих случаях позволяет оценить влияние окружающей среды на разрабатываемые ЭС.

В последнее время большое практическое значение приобретает информация о надежности ЭС, получаемая в результате натурных испытаний в условиях открытого космоса.

К физическим относятся также эксплуатационные испытания ЭС. Один из основных видов таких испытаний – опытная эксплуатация. Иногда проводят подконтрольную эксплуатацию, которую условно можно отнести к эксплуатационным испытаниям. При подготовке к подконтрольной эксплуатации обслуживающий персонал, руководствуясь специально разработанной документацией, осуществляет сбор, учет и первичную обработку информации.

Испытания с использованием моделей осуществляют методами физического и математического моделирования, которыми в ряде случаев можно заменить сложные физические испытания реальных ЭС или их макетов. На выходные параметры ЭС оказывают влияние изменения

параметров элементов, колебания напряжений питания, температуры окружающей среды, влажности и др., т. е. большая группа (часто взаимосвязанных) параметров, которые при создании моделей отказов называют первичными (входными).

Физическое моделирование состоит в том, что первичный параметр объекта испытаний заменяется простой физической моделью, способной имитировать изменения данного параметра.

Физические модели могут подвергаться статистическим испытаниям. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) заключается в том, что путем многократных случайных испытаний (вычислений, производимых над случайными числами) определяют вероятность появления некоторого случайного события (математического ожидания случайной величины). Метод позволяет определить характеристики надежности в предположении, что известен механизм отказов ЭС при различных сочетаниях значений параметров, выбираемых случайным образом согласно заданной статистической модели. Метод статистических испытаний предусматривает проведение испытаний на реальных объектах или их физических моделях. При испытаниях на реальных объектах производят исследование возможных причин отказов ЭС и их последствий, искусственно вводя в схему обрывы, короткие замыкания или устанавливая элементы с параметрами, выходящими за допустимые нормы. При испытаниях на моделях ЭС ряд элементов заменяют их физическими моделями, параметры которых можно менять. Моделирование элементов осуществляют на специальных Стендах, на которых воспроизводят случайные изменения указанных параметров.

Частным видом статистических испытаний ЭС являются граничные испытания. Их проводят для определения зависимостей предельно допустимых значений параметров ЭС от режимов эксплуатации.

Метод граничных испытаний состоит в нахождении области таких значений параметров ЭС, при которых значения выходных (вторичных или эксплуатационных) параметров находятся в пределах допуска, т.е. области безотказной работы ЭС.

Каждый выходной параметр Y_i (а их в общем случае может быть счетное множество) зависит от множества входных параметров $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n$, т. е. для каждого выходного параметра можно записать:

$$Y_i = f_i(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n) \quad (2.11)$$

где $Y_i \in y$, $i = 1, \dots, k$, $j = 1, \dots, n$.

Для безотказной работы ЭС должно выполняться условие

$$y_{i \min} < y_i < y_{i \max} \quad (2.12)$$

что соответствует изменению значения каждого входного параметра в пределах $x_{j \min} < x_j < x_{j \max}$.

Таким образом, область безотказной работы ЭС определяется путем изменения значений входных параметров и фиксации предельных значений выходных параметров, превышение которых приводит к отказам ЭС.

Граничные испытания выполняют в процессе проектирования и в процессе эксплуатации. Испытания могут быть реализованы аналитическим, графическим и графоаналитическим способами.

Аналитический способ применяют для испытания несложных изделий, имеющих простую математическую модель, характеризующуюся, как правило, функциональной зависимостью одного выходного и одного входного параметра. Границы области безотказной работы определяют расчетным путем с помощью уравнения (2.11), которое в данном случае упрощают: $y_i = f_i(x_i)$.

Графический способ используют для сложных изделий, когда выходной параметр зависит от нескольких входных. В этом случае определить область безотказной работы ЭС при одновременном изменении многих первичных параметров практически невозможно. Поэтому границы области безотказной работы определяют экспериментально путем построения сечения функции (2.11) для каждого входного параметра x , т. е. находят допустимые пределы изменения значений этих параметров в зависимости от значения выбранного параметра граничных испытаний.

Построение сечения функции выполняют следующим образом. На основании анализа требований, предъявляемых к ЭС, выбирают один или несколько критериев отказа. Один из параметров ЭС принимают за так называемый параметр граничных испытаний $x_{гр}$. Устанавливают номинальные значения входного параметра x_j , по которому производится сечение функции (2.11), и параметра $x_{гр}$. При этом значения остальных входных параметров сохраняют постоянными.

Изменяют значение параметра $x_{гр}$ в меньшую и большую сторону от номинального значения до момента отказа ЭС – ухода значения выходного параметра y_i за границы поля допуска, определяемые

неравенством (2.12). Аналогичные испытания осуществляют для других значений X_j отличных от номинального значения. В результате получают несколько точек, соответствующих предельным значениям выходного параметра Y_i . Соединив эти точки, устанавливают *область безотказной работы* ЭС.

Пример построения области безотказной работы (графика граничных испытаний) ЭС приведен на рисунке 2.4, а. В качестве параметра граничных испытаний выбрано напряжение питания U_{cp} , а в качестве изменяемого входного параметра – сопротивление R_k в коллекторной цепи RC-усилителя. Точки 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3', соответствующие предельным значениям выходного параметра, получены при изменении напряжения $U_{гр}$ в меньшую (1, 2, 3) и в большую (1', 2', 3') сторону от номинального значения при определенных значениях сопротивления R_k . Кривая линия, соединяющая достаточное число подобных точек, является границей, разделяющей область безотказной работы и область отказов ЭС.

Аналогично проводят построение сечения функции (2.11) по другому входному параметру – X_j (например, разделительной емкости RC-усилителя), сохраняя значения остальных входных параметров ЭС постоянными. Изменяя значение параметра граничных испытаний, получают другую область безотказной работы, соответствующую различным значениям. Таким образом, для всех входных параметров строят ряд графиков, наложив которые друг на друга, можно получить область безотказной работы. При этом изменение входных параметров производят в пределах, значительно превышающих заданные ТУ, с целью определения потенциального запаса надежности ЭС. На рис. 2.4,б в качестве примера показано построение области безотказной работы для двух входных параметров (R_k и C).

Изменение первичных параметров при проведении граничных испытаний имитируют различными методами. Так, постоянные резисторы и конденсаторы испытываемого изделия заменяют переменными или осуществляют поочередную замену исследуемого элемента однотипным с известными отклонениями его параметра от номинала. Имитацию получают также последовательным или параллельным включением в схему дополнительных элементов с соответствующими номиналами.

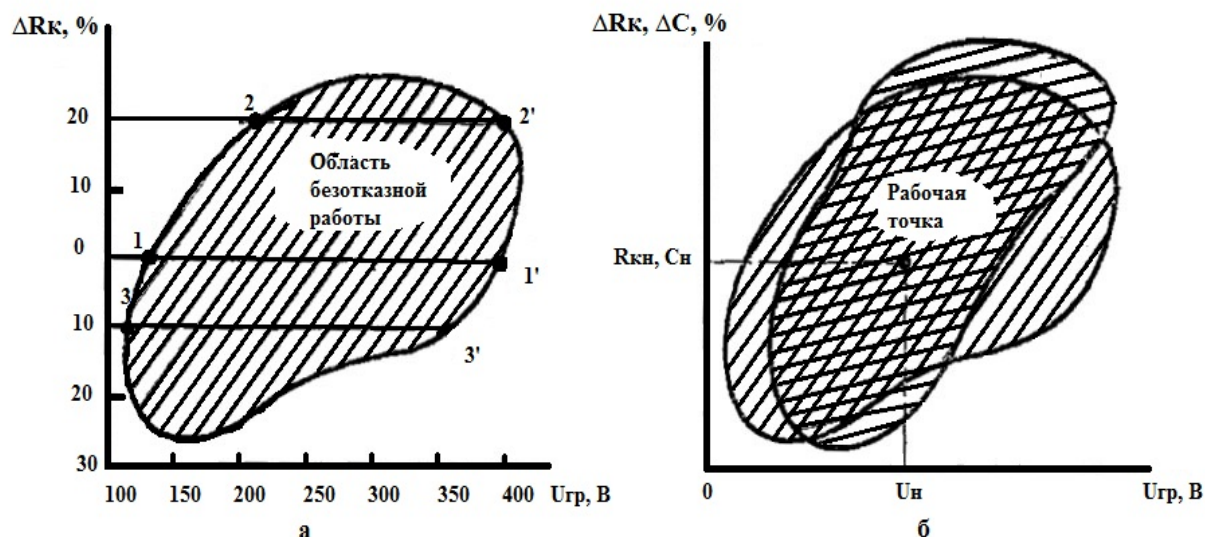


Рисунок 2.4 – Построение области безотказной работы ЭС при изменении значений одного (а) и двух (б) входных параметров: $R_{кн}$, C_n , U_n – номинальные значения параметров.

Графики граничных испытаний позволяют: прогнозировать отказы ЭС; определять правильность выбора номинальных значений параметров элементов того или иного изделия, питающих напряжений; сравнивать «запас» надежности ЭС – по площади областей безотказной работы и положению рабочей точки. Чем больше площадь области безотказной работы и чем дальше отстоит от ее границ рабочая точка, тем больше запас надежности. К недостаткам метода граничных испытаний относятся невозможность количественной оценки надежности и большая трудоемкость проведения экспериментов, что не позволяет получать данные об изменении выходных параметров ЭС при изменении комплекса внешних воздействий и взаимодействии элементов.

Снизить трудоемкость граничных испытаний позволяет графоаналитический способ, сущность которого состоит в следующем: функцию (2.11) разлагают в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки, ограничиваясь членами первого порядка. В результате получают неравенства (условия безотказной работы ЭС), в состав которых входят частные производные. Экспериментальная часть данного метода испытаний заключается в определении этих производных графическим путем. По значениям частных производных оценивают влияние каждого из входных параметров.

Матричные испытания, являющиеся развитием метода граничных испытаний, используют для решения следующих задач: определения

области безотказной работы ЭС, вычисления вероятности нахождения значения выходного параметра ЭС в этой области, оптимизации параметров элементов схемы и допусков на них по заданной работоспособности изделия. Эти испытания заключаются в моделировании рабочей области ЭС при всех возможных значениях первичных параметров, находящихся в пределах допусков, и сопоставлении рабочей области с областью безотказной работы.

Моделирование осуществляют следующим образом. Диапазон $X_{imin} \dots X_{imax}$ возможных изменений значений каждого входного параметра разбивают на равные интервалы, называемые квантами. Перебор всех возможных сочетаний квантов, т. е. ситуаций, производят в соответствии с заранее составленной таблицей – матрицей ситуаций. Обычно такая матрица содержит число столбцов, равное числу моделируемых параметров, и число строк, равное числу перебираемых ситуаций. Результаты испытаний записываются в виде матрицы-столбца с числом элементов, равным числу реализаций. Использование ЭВМ позволяет ускорить перебор ситуаций, проверку работоспособности ЭС в каждой ситуации в соответствии с заданными критериями отказа, регистрацию числа и характера отказов. Результаты испытаний печатаются на бумажной ленте в виде матрицы.

Математическое моделирование базируется на использовании уравнений, связывающих входные и выходные параметры объекта испытаний (в предыдущих методах такая связь реализуется непосредственно в физической модели) Эти уравнения выводят, изучая конкретные ЭС и их внутренние функциональные связи, после чего выполняют математическое описание установленных связей с учетом влияния на ЭС различных факторов. Основной недостаток метода – огромный объем теоретических и экспериментальных исследований для определения соотношений, характеризующих математическую модель изделия, что требует применения ЭВМ с высоким быстродействием и большой емкостью памяти, а также знания законов распределения входных и выходных параметров изделия.

Значительная трудоемкость экспериментальных исследований, технические сложности реализации физических моделей ряда изделий (например, высокочастотных, импульсных), высокая стоимость и длительность проведения испытаний ограничивают использование

методов физического и математического моделирования в практике испытаний ЭС.

По назначению испытания можно разделить на исследовательские, определительные, сравнительные и контрольные. *Исследовательские испытания* проводят для изучения определенных характеристик свойств ЭС. Результаты этих испытаний служат для решения следующих задач:

- определения или оценки показателей качества функционирования испытываемых ЭС в определенных условиях эксплуатации;
- выбора оптимальных режимов работы и показателей надежности ЭС;
- сравнения множества вариантов реализации ЭС при проектировании и аттестации; построения математической модели функционирования ЭС (оценки параметров математической модели);
- отбора существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования ЭС;
- выбора математической модели ЭС из заданного множества вариантов.

Примером исследовательских испытаний могут служить испытания моделей. Особенностью исследовательских испытаний является факультативный характер их проведения; они, как правило, не применяются при сдаче готовой продукции.

Определительные испытания проводят для определения количественных показателей надежности ЭС с заданной достоверностью. Показатели определяют экспериментально путем испытаний и последующих измерений, анализа диагностирования, с помощью органолептических ⁷ методов регистрации отказов, повреждений и других событий.

Сравнительные испытания служат для сравнения показателей надежности аналогичных или одинаковых объектов. Так, на практике иногда возникает необходимость сопоставить качество аналогичных по характеристикам или даже одинаковых ЭС, выпускаемых различными предприятиями. Для этого сравниваемые объекты испытывают в идентичных условиях.

⁷ Органолептические методы основаны на восприятии органами чувств такой информации, которая не может быть представлена численно.

Контрольные испытания, составляющие наиболее многочисленную группу испытаний, проводят для установления соответствия характеристик ЭС заданным.

Испытания на этапах проектирования, изготовления и выпуска изделий. Как уже отмечалось, цели и задачи испытаний меняются в течение жизненного цикла изделия. В связи с этим понятно выделение испытаний по этапам. На указанных этапах проводят доводочные, предварительные и приемочные испытания. Эти испытания по своему назначению могут быть исследовательскими, контрольными, сравнительными, определительными. Так, *доводочные испытания* – исследовательские, и проводят их при проектировании изделий с целью оценки влияния вносимых в ЭС изменений (конструктивных, схемотехнических и др.) для достижения заданных значений показателей качества; *предварительные испытания* являются контрольными для опытных образцов и/или опытных партий продукции и проводятся с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания; *приемочные испытания* также являются контрольными для опытных образцов, опытных партий продукции или единичных изделий. Эти испытания проводят для решения вопроса о целесообразности постановки продукции на производство (в случае опытных образцов) или передачи ее в эксплуатацию (в случае производства единичных изделий).

Испытания готовой продукции подразделяют на квалификационные, предъявительские, приемосдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттестационные, сертификационные.

Квалификационные испытания проводят на установочной серии или первой промышленной партии изделий, т. е. на стадии освоения производства ЭС. Цель их – оценка готовности предприятия к выпуску продукции данного типа в заданном объеме. *Предъявительские испытания* проводит служба технического контроля предприятия-изготовителя перед предъявлением ЭС для приемки представителем заказчика, потребителем или другими органами приемки. *Приемосдаточные испытания* проводят в освоенном производстве. Это контрольные испытания изготовленной продукции при приемочном контроле. Как правило, их осуществляет изготовитель продукции. Если же на предприятии-изготовителе имеется представитель заказчика, приемосдаточные испытания проводятся им в присутствии представителя предприятия-изготовителя.

С целью контроля стабильности качества продукции и возможности продолжения ее выпуска проводят *периодические испытания* продукции в объеме и в сроки, установленные НТР, обычно каждый месяц или квартал, а также в начале выпуска ЭС и при возобновлении производства после временного прекращения. Периодические испытания включают в себя такие испытания, при которых вырабатывается часть ресурса ЭС (длительная вибрация, многократные удары, термоциклы). Это сравнительно дорогостоящие испытания, и поэтому они всегда являются выборочными. Результаты периодических испытаний распространяют на все партии, выпущенные в течение определенного времени.

Инспекционные испытания – это особый вид контрольных испытаний. Их осуществляют выборочно для контроля стабильности качества установленных видов продукции специально уполномоченными организациями. *Типовые испытания* – это испытания выпускаемой продукции, проводимые с целью оценки эффективности внесения конструктивных изменений, применения новых материалов или ТП. Электронные средства могут оцениваться по категориям качества или на соответствие их характеристик требованиям национальных и международных стандартов. Для оценки качества продукции при ее аттестации по категориям качества проводят *аттестационные испытания*, а для установления соответствия показателей качества ЭС национальным и/или международным НТД – *сертификационные испытания* продукции.

По продолжительности все испытания подразделяют на нормальные, ускоренные и сокращенные. Под *нормальными* понимают испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение в необходимом объеме информации о показателях надежности изделия за такое же время, что и при эксплуатации. Методы и условия проведения *ускоренных испытаний* обеспечивают получение необходимой информации о качестве ЭС в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях. *Сокращенные испытания* выполняют по сокращенной программе.

По уровню проведения испытаний ЭС их можно разделить на государственные, межведомственные и ведомственные. К *государственным* относят испытания важнейших видов ЭС, проводимые головной организацией по государственным испытаниям, или приемочные испытания, проводимые государственной комиссией. *Межведомственные*

– это приемочные испытания ЭС, разработанных совместно несколькими ведомствами. Эти испытания проводит комиссия из представителей нескольких заинтересованных министерств и ведомств. *Ведомственные* испытания осуществляются комиссией из представителей заинтересованных министерства и ведомства.

По виду воздействия различают механические, климатические, тепловые, радиационные, электрические, магнитные, электромагнитные, химические (воздействие специальных сред) и биологические (воздействие биологических факторов) испытания.

По результату воздействия на ЭС испытания делят на разрушающие и неразрушающие, а также испытания на стойкость, прочность, устойчивость. Испытания являются *разрушающими*, если в процессе их проведения применяют разрушающие методы контроля или в результате воздействия внешних факторов испытываемые объекты становятся непригодными для дальнейшего использования. Методы неразрушающего контроля применяют как взамен разрушающих, так и в дополнение к ним. При этом сокращается время анализа отказов, а в ряде случаев более точно устанавливаются место и вид дефекта.

По определяемым характеристикам объекта различают испытания на надежность, граничные и технологические. Наиболее важными из них являются *испытания на надежность*. Надежность любого изделия характеризуется безотказностью, долговечностью, сохраняемостью и ремонтпригодностью.

Под безотказностью понимают свойство ЭС непрерывно сохранять работоспособность в течение заданного времени в определенных режимах и условиях эксплуатации. С течением времени происходят износ и старение, вызывающие отказы ЭС. *Долговечность* невозстановливаемого изделия характеризуется его наработкой до отказа, т.е. продолжительностью работы изделия от начала его эксплуатации (испытаний) до возникновения первого отказа. Для восстанавливаемых изделий (к ним относятся отдельные виды ЭС), конструкция которых включает навесной монтаж элементов, в понятие «долговечность» вкладывается несколько иной смысл. Долговечность таких ЭС ограничивается соображениями технической и экономической целесообразности их дальнейшего использования. При этом ЭС могут иметь большое число отказов за время эксплуатации, для устранения которых изделия ремонтируют, заменяя отказавшие элементы. *Поэтому*

под долговечностью восстанавливаемого изделия понимают его свойство сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов. Календарная продолжительность эксплуатации ЭС от ее начала до наступления предельного состояния составляет срок службы ЭС. Помимо понятия «срок службы» в практике существует понятие «гарантийный срок службы» ЭС, устанавливающий взаимоотношения между заказчиком и изготовителем. Гарантийный срок службы изделия всегда меньше его действительного срока службы. Если в течение гарантийного срока происходит отказ изделия, то ответственность за него несет изготовитель, который должен выполнить ремонт отказавшего изделия, а в случае невозможности ремонта заменить изделие исправным. По истечении гарантийного срока службы предприятие-изготовитель не несет ответственности за отказы ЭС, но при этом не исключается, что изделия остаются надежными и технически пригодными для дальнейшей эксплуатации.

Сохраняемость – свойство ЭС сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и/или транспортирования. *Под ремонтпригодностью* для восстанавливаемых изделий понимают свойство ЭС, заключающееся в приспособленности к восстановлению и поддержанию заданного технического ресурса путем предупреждения, обнаружения и устранения неисправностей и отказов. Количественно ремонтпригодность оценивается трудоемкостью восстановления работоспособности изделий, которая определяется затратами времени и средств на диагностику отказов с учетом необходимой квалификации обслуживающего персонала, уровня технической оснащенности и системы организации ремонта. Под ремонтпригодностью невозстанавливаемых изделий понимается их приспособленность к проверке технического состояния и удобной замене.

Надежность как свойство закладывается в ЭС при разработке и изготовлении, а оценивается в процессе испытаний и эксплуатации с помощью количественных и качественных показателей надежности. Испытания, в результате которых оценивается надежность ЭС, называют испытаниями на надежность.

Эти испытания могут быть как определительными, так и контрольными. Результатами определительных испытаний на надежность пользуются для установления фактических показателей надежности.

Контрольные испытания на надежность проводят для оценки соответствия показателей надежности ЭС требованиям, установленным ТЗ и ТУ.

Большое разнообразие условий эксплуатации и видов нагрузок, которым могут подвергаться ЭС, не позволяет ограничиваться проведением какого-либо одного из рассмотренных видов испытаний для того, чтобы гарантировать их надежную работу в различных условиях применения. Только по результатам всех видов испытаний оценивается качество ЭС в целом и принимается соответствующее решение о возможности предъявления их на приемочные испытания, постановки на производство, об окончании освоения серийного производства или о его продолжении, о присвоении категории качества и т. д.

2.4. Проведение лабораторных и стендовых испытаний

В настоящее время применяют следующие способы проведения лабораторных и стендовых испытаний: последовательный, параллельный, последовательно-параллельный и комбинированный. При *последовательном способе* одно и то же ЭС последовательно подвергают всем предусмотренным программой видам испытаний. Исключение составляют испытания, проводимые при воздействии большинства химических и биологических внешних факторов, которые, как правило, осуществляют на различных выборках. Последовательность испытаний предусматривает обычно первоочередное выявление наиболее грубых дефектов изделий, например, ошибок маркировки, коротких замыканий и обрывов при приемосдаточных испытаниях.

Важное условие проведения последовательных испытаний – соблюдение определенного порядка воздействия внешних факторов. Иногда при составлении программы испытаний предусматривают такую последовательность воздействия внешних факторов, согласно которой вначале действуют наиболее сильно влияющие на данное ЭС внешние факторы. Этим достигается скорейшее выявление потенциально ненадежных образцов и сокращается время испытаний. Однако при этом теряется большая часть информации о влиянии других факторов, которая могла быть получена при их воздействии. Поэтому на практике чаще рекомендуется начинать испытания с воздействия наименее жестких внешних факторов, оказывающих наименьшее влияние на ЭС. Такой способ испытаний позволяет точнее определить причины наблюдаемых

отказов и составить более полную картину о наличии потенциальных дефектов ЭС. С другой стороны, если наиболее опасные для объекта ВВФ воздействуют в конце последовательных испытаний, то значительно увеличивается время их проведения.

Установление единой последовательности проведения испытаний ЭС различных видов вряд ли оправдано. Оптимальная последовательность проведения испытаний зависит от назначения ЭС и предполагаемых условий эксплуатации. Поэтому для конкретных ЭС последовательность проведения испытаний указывается в ТУ или программе испытаний. В то же время рекомендуется, например, перед проверкой герметичности и влагоустойчивости ЭС проводить механические испытания, способные вызвать разгерметизацию изделий. По этой же причине все климатические испытания целесообразно проводить после механических.

Недостатком последовательного способа проведения испытаний является накопление деградационных изменений в физической структуре объекта испытаний по мере перехода от одного ВВФ к другому. В результате каждое воздействие предыдущего фактора оказывает влияние на результаты испытаний при воздействии последующего, что усложняет интерпретацию результатов испытаний и ускоряет износ ЭС.

При параллельном способе проведения испытаний изделия подвергают воздействию различных ВВФ одновременно (параллельно) на нескольких выборках. Такой способ позволяет получить большой объем информации за значительно более короткий промежуток времени, чем последовательный способ, при минимальном износе испытываемых образцов. Однако параллельный способ требует существенно большего числа испытываемых изделий, чем последовательный.

Компромиссным является *последовательно-параллельный способ* испытаний, позволяющий в каждом конкретном случае более эффективно использовать преимущества того или иного способа и находить оптимальные варианты их сочетания. При последовательно-параллельном способе все изделия, отобранные для испытаний, разбивают на несколько групп, которые испытывают параллельно. В каждой группе испытания проводят последовательным способом.

Все виды испытаний также разбивают на группы, число которых равно числу групп испытываемых изделий. Группы испытаний формируют по видам испытаний таким образом, чтобы, с одной стороны, продолжительность испытаний во всех группах была примерно

одинаковой, а с другой – условия проведения объединенных в одну группу испытаний были близки к реальным. В то же время испытания на грибоустойчивость, длительное воздействие тепла и морского тумана, воздействие солнечной радиации рекомендуется проводить на образцах, не подвергшихся другим видам климатических и механических воздействий. Приведем возможный вариант группирования видов испытаний и последовательности их проведения в каждой группе:

Группа I: виброустойчивость, вибропрочность при длительном воздействии вибрации, ударная прочность, ударная устойчивость, устойчивость к воздействию центробежного ускорения, воздействие одиночных ударов с большим ускорением, циклическое воздействие температуры, воздействие солнечной радиации, воздействие пыли.

Группа II: теплоустойчивость при длительном воздействии повышенной температуры, воздействие морского тумана.

Группа III: влагоустойчивость при длительном воздействии влаги, холодоустойчивость, воздействие инея и росы.

Группа IV: грибоустойчивость.

В каждом способе испытаний предусматривается, как правило, раздельное воздействие на ЭС внешних факторов, что является существенным отличием от реальных условий их эксплуатации. Поскольку при лабораторных и стендовых испытаниях практически невозможно имитировать реальные условия эксплуатации ЭС, ограничиваются определенным комплексом стандартных испытаний. Простые и универсальные, они сложились на эмпирических принципах. Не имитируя реальных условий эксплуатации, эти испытания тем не менее позволяют получить информацию, дающую уверенность в том, что вновь разрабатываемые изделия будут обладать в эксплуатации не худшими характеристиками, чем предшествующие изделия.

С целью приближения лабораторных условий испытаний ЭС к реальным условиям эксплуатации все большее распространение находит комбинированный способ испытаний, при котором на ЭС одновременно воздействуют несколько внешних факторов.

Так, для имитации условий вибрации в космическом пространстве проводят лабораторные испытания на вибрацию при одновременном

воздействии на ЭС низкой температуры и вакуума. Механические испытания самолетных ЭС, эксплуатируемых при низких температурах проводят также в аналогичных условиях. При этом требуемая температура обеспечивается подачей охлаждающего реагента непосредственно к испытываемому образцу.

Выбор сочетаний совместных воздействий различных факторов на испытываемые ЭС можно производить с помощью таблицы 2.1.

Основное ограничение широкого применения комбинированного воздействия при лабораторных и стендовых испытаниях связано с отсутствием необходимого оборудования, а также со сложностью и высокой стоимостью проведения таких испытаний

Многообразие разрабатываемых и выпускаемых ЭС не позволяет дать однозначной рекомендации по выбору способа проведения лабораторных и стендовых испытаний и последовательности воздействия внешних факторов. Однако алгоритм испытаний всегда должен выбираться исходя из результатов воздействий того или иного фактора на конкретный объект испытаний и условий его последующей эксплуатации. При этом следует обращать внимание на то, что в процессе испытаний механизм отказов ЭС усиливался и все потенциально ненадежные образцы были обязательно выявлены.

Таблица 2.1 – Комбинирование внешних факторов

Внешнее воздействие	Повышенная температура	Пониженная температура	Влажность	Дождь	Туман (морской)	Солнечная радиация	Грибообразование	Пыль и песок	Низкое атмосферное давление	Ветер	Загрязнение воздуха	Соляной туман	Вибрация	Звуковое давление	Удар	Ионизированные газы	Космическая радиация
Повышенная температура			1	X	6	1	4	6	1	1 –	X	1	1	1	1	1	X
Пониженная температура			1	1 –	X	6	6	1 –	3 –	3	X	6	1	1 –	1	6	X
Влажность	1	1		4	4	1 –	4	1 –	1	X	1	6	1 –	X	X	X	X
Дождь	X	1 –	4		2	7	4	X	X	3	5	6	X	X	X	X	X
Туман (морской)	6	X	4	2		6	4	1 –	X	6	1	1 –	X	X	X	X	X
Солнечная радиация	1	6	1 –	7	6		6	1 –	1 –	1	X	1	1	X	X	1	5
Грибообразование	4	6	4	4	4	6		X	X	X	X	X	X	X	X	6	X
Пыль и песок	6	1 –	1 –	X	1 –	1 –	X		X	3	1 –	1 –	1 –	X	X	X	X
Низкое атмосферное давление	1	3 –	1	X	X	1 –	X	X		6	X	X	1 –	1 –	1 –	5	3 –
Ветер	1 –	3	X	3	6	1	X	3	6		5	1	X		X	X	X
Загрязнение воздуха	X	X	1	5	1	X	X	1 –	X	5		X	X	X	X	X	X
Соляной туман	1	6	6	6	1 –	1	X	1 –	X	1	X		1 –	X	X	X	X
Вибрация	1	1	1 –	X	X	1	X	1 –	1 –	X	X	1 –		X	X	X	X
Звуковое давление	1	1 –	X	X	X	X	X	X	X	1 –	X	X	X		X	X	X
Удар	1	1	X	X	X	X	X	X	1 –	X	X	X	X	X		X	X
Ионизированные газы	1	6	X	X	X	1	6	X	5	X	X	X	X	X	X		1 –
Космическая радиация	X	X	X	X	X	5	X	X	3 –	X	X	X	X	X	X	1 –	

Обозначения 1 – механический износ, 2 – ухудшение работоспособности, 3 – механический износ и ухудшение работоспособности, 4 – взаимосвязанные факторы, 5 – один фактор влияет на другой, 6 – взаимоослабляющие факторы, 7 – несовместимые факторы, X – сочетание факторов не рассматривается, знак «–» после чисел 1–3, означает что совместное действие факторов уменьшает их влияние

2.5. Программа испытаний ЭС

Программа испытаний (ПИ) – это обязательный для выполнения организационно-методический документ, оформляемый следующим образом. На титульном листе размещают:

наименование программы (например, «Типовые испытания микросборок на поликоровых и металлических подложках»); название темы, по которой ведется разработка изделия; согласующие и утверждающие программу подписи руководителей организации – разработчика ЭС и (при необходимости) представителя заказчика.

Программа испытаний состоит из шести разделов. Раздел I «Объект испытаний» включает наименование, чертежный и заводской номера, дату выпуска объекта испытаний. В разделе 2 «Цель испытаний» ставится конкретная цель (или цели) испытаний. В разделе 3 «Обоснование необходимости проведения испытаний» указываются плановые документы, в которых регламентирована необходимость проведения испытаний (например, программа обеспечения качества). Раздел 4 «Место проведения и обеспечение испытаний» содержит наименование подразделения, в котором проводятся испытания, а также план работ по их подготовке и проведению с указанием объема, срока исполнения и соответствующих исполнителей работ. Раздел 5 «Объем и методика испытаний», раскрывающий содержание испытаний, разбивается на два подраздела. В первом указываются условия испытаний (число образцов, распределение их на группы, последовательность прохождения испытаний различными группами по видам воздействий с регламентацией количественной оценки каждого воздействия) и номера чертежей оснастки, необходимой для их проведения. Второй подраздел включает сведения о контролируемых параметрах изделия с указанием документации, по которой требуется измерить или определить эти параметры. В разделе 6 «Оформление результатов испытаний» регламентируется форма представления результатов испытаний: протокол, отчет, техническая справка.

Содержание основных разделов ПИ и рекомендации по их выполнению. При составлении раздела 1 следует учитывать, что по результатам испытаний объекта принимается то или иное решение по данному объекту – о его годности или забраковании, предъявлении на следующие испытания или возможности серийного выпуска и др. Объектами испытаний могут быть: макеты, модели, экспериментальные образцы изделия, изготовленные при выполнении научно-исследовательских работ

(НИР) на этапах проектирования; опытные образцы изделия, изготовленные при выполнении опытно-конструкторских работ (ОКР); образцы, изготовленные при освоении изделия в производстве; образцы, изготовленные в ходе серийного производства.

Испытаниям подвергают изделия, соответствующие НТД по конструкции, внешнему виду, а также параметрам, определяемым при нормальных климатических условиях. Изделия следует испытывать в тех условиях, в которых их эксплуатируют. Если составные части изделия при монтаже, транспортировке и эксплуатации находятся в неодинаковых условиях, их можно испытывать раздельно в соответствии с условиями эксплуатации каждой части. В этом случае допускается также проводить испытания изделия в целом, но по программе, учитывающей условия эксплуатации. Но если, например, производится испытание ЭВМ, в состав которой входят устройства ввода – вывода, запоминающее и арифметическое устройства и др., то объектом испытаний считается ЭВМ в целом.

Если масса и габаритные размеры изделия не позволяют его испытывать в условиях лаборатории, то необходимую информацию о работоспособности и сохранности внешнего вида после воздействия объективных факторов получают по результатам анализа испытаний составных частей изделия. В том случае, когда изделие конструктивно не может быть разделено на составные части, допускается испытывать макеты, если конструкция и технология изготовления Макетов обеспечивают их адекватность реальному изделию.

В зависимости от вида и этапа разработки продукции объектом испытаний может быть единичное изделие или партия изделий, подвергаемая сплошному или выборочному контролю. Например, на испытания предъявляется партия телевизоров объемом N . Из N изделий делается выборка n изделий, характеристики которых определяются. Результаты оценки и контроля выборочными методами распространяются на всю партию из N телевизоров. В этом случае объектом испытаний является вся партия телевизоров.

Если объектом испытаний служит макет или модель изделия, то результаты испытаний относятся непосредственно к макету или модели. Однако если при испытании какого-либо изделия некоторые его элементы заменяют моделями и отдельные характеристики изделия определяют на основе испытаний этих моделей, то объектом испытаний остается само изделие.

При выборе объекта испытаний следует исходить из того, что в процессе испытаний должна быть подтверждена работоспособность

изделия/изделий при указанных в НТД условиях эксплуатации, а также соответствие значений показателей надежности изделия/изделий требуемым НТД. При этом должно быть предусмотрено: наличие соответствующих устройств для проведения испытаний, минимальные стоимость (включая затраты на устройства для испытаний) и продолжительность испытаний, взаимозаменяемость испытываемых изделий или отдельных функциональных узлов и блоков (для ремонтпригодных изделий) в процессе испытаний.

Для отдельных видов испытаний целесообразно выбрать типопредставитель из номенклатуры изделий, изготавливаемых по близкому конструктивно-технологическому решению. Для этого разработана методика, направленная на то, чтобы результаты испытаний выбранного объекта можно было распространить на всю номенклатуру изделий данного конструктивно-технологического варианта. В соответствии с этой методикой в каждом изделии рассматриваемого варианта выявляют номенклатуру и число элементов, определяющих надежность изделия (например, переходов со слоя на слой в коммутационной плате, элементов критических размеров пленочных и полупроводниковых ИС и т. д.). Из сравниваемых изделий выбирают изделие, обладающее широкой номенклатурой и насыщенностью такими элементами. Это изделие и рекомендуется использовать в качестве типичного для рассматриваемого конструктивно-технологического варианта при проведении испытаний.

Цели испытаний, которые должны быть сформулированы в разделе 2, достаточно разнообразны. Они определяются как видом испытаний, так и этапом жизненного цикла изделий и описаны в § 1.6, 2.3.

Цели испытаний раскрывают их назначение, которое должно быть отражено в названии. Поэтому, чтобы сформулировать название испытаний, необходимо установить их назначение, т. е. определить по цели проведения испытаний, к какой из четырех групп (исследовательские, контрольные, сравнительные, определительные) их можно отнести. Аналогично в названии испытаний должны быть учтены и другие признаки вида испытаний (стадия проведения испытаний, продолжительность, вид и результат воздействий и др.). Соответственно название испытаний может содержать два и более признаков из числа перечисленных, например, межведомственные и периодические стендовые испытания на надежность.

План проведения испытаний, входящих в раздел 4 ПИ, содержит перечень работ, необходимых для проведения испытаний: изготовление образцов, приемка образцов ОТК, измерение и определение параметров образцов испытаний, подготовка устройств для испытаний, проведение

испытаний, оформление результатов испытаний, согласование и утверждение протокола испытаний и др.

Уникальность и многообразие свойств современных ЭС не позволяют определить на испытаниях все свойства изделий во всех возможных при эксплуатации режимах. Поэтому план испытаний содержит выборку проверяемых свойств. Для устранения субъективизма при выборе проверяемых свойств применяется методика распределения их по степени важности. В соответствии с этой методикой каждое свойство классифицируется как критичное или второстепенное в зависимости от его влияния на функционирование, технический ресурс и взаимозаменяемость испытываемых изделий. Определению приоритетных свойств ЭС в значительной мере помогает знание физики их отказов. Изучение природы дефектов позволяет выделить наиболее информативные параметры контроля, с помощью которых выявляют потенциально ненадежные изделия.

Под *условиями испытаний*, входящих в раздел 5 ПИ, понимают совокупность воздействий на объект и режимов функционирования объекта. Как указывалось ранее, условия испытаний характеризуются воздействием на объект как объективных, так и субъективных факторов. Поскольку основная цель испытаний состоит в получении информации о потенциально ненадежных изделиях, выбору воздействующих факторов придают первостепенное значение. При этом учитывают: местоположение объекта, в составе которого используются ЭС (наземные, самолетные, корабельные и др.); уровень разукрупнения испытываемых ЭС (система, комплекс, устройство, функциональный узел), что определяет число выбранных для испытаний ВВФ; климатический район эксплуатации ЭС, условия эксплуатации, транспортировки и хранения. Однако основные принципы выбора воздействующих факторов следующие: адекватность условий испытаний условиям эксплуатации; учет механизма старения или развития отказа; учет потенциальной надежности всех элементов конструкции.

Для установления адекватности условий испытаний условиям эксплуатации необходим *физический подход к выбору воздействующих факторов*, который предполагает знание закономерностей возникновения и развития отказов и определение влияния различных факторов на скорость изменения запаса прочности изделия. Анализ диагностики отказов позволяет выявить физико-химические процессы, происходящие в физической структуре элементов и деталях конструкции ЭС. При этом очевидны причинно-следственные связи между указанными процессами и внешними и внутренними воздействиями. Целесообразно элементы физической структуры исследуемого изделия, изменение состояния которых вызывает

его отказы, разделить в зависимости от их основных функций на следующие группы: конструктивные, обеспечивающие необходимую геометрию изделий, сочленение его с другими изделиями и соединение элементов друг с другом; активные (рабочие области), физические процессы в которых обеспечивают функционирование изделия; защитные, потеря свойств которых приводит к возникновению и усилению деградиационных процессов в активных элементах. Например, в ИС можно выделить кристалл, оксид, металлизацию, внутрисхемные контакты (термокомпрессионные или ультразвуковые), проводники для соединения металлизации с выводами корпуса, корпус. Указанные элементы физической структуры выполняют различные функции: кристалл – активные, конструктивные; оксид – защитные; проводники – активные, конструктивные и т.д. Таким образом, физическую структуру ИС можно разделить на активные, конструктивные и защитные элементы.

Условное разделение физической структуры на элементы позволяет: установить основные характеристики ЭС и определить критичные для них виды воздействий, а следовательно, и факторы, вызывающие появление деградиационных процессов; выявить элементы с наименьшей потенциальной надежностью, что обеспечивает объективность выбора номенклатуры и уровней воздействующих факторов, которые приводят к наиболее быстрому изменению определенного вида прочности (механической, электрической, тепловой). При выборе ВВФ следует помнить, что результат их совместного действия не является результатом аддитивного действия отдельных факторов и что определенные виды отказов имеют место только при совместном действии факторов. Например, возникновение короткого замыкания между близлежащими на поверхности печатной платы проводниками наиболее вероятно при наличии повышенной влажности и электрического напряжения.

На основании приведенных соображений необходимо при определении условий испытаний выбирать номенклатуру ВВФ, характерную для условий эксплуатации, чтобы обеспечить адекватность условий испытаний условиям эксплуатации. В то же время при эксплуатации, как правило, имеет место более жесткое воздействие на ЭС по сравнению с лабораторными или стендовыми испытаниями. Поэтому для испытаний на надежность следует выбирать значения ВВФ, превышающие характерные для нормальных условий эксплуатации ЭС.

Уровень воздействия должен учитывать наличие двух типов процессов, вызывающих изменение состояния элементов физической структуры испытываемых изделий – обратимых и необратимых. Изменение характера процессов определяется как граница изменений значений факторов – от

допустимых или предельно допустимых (при которых имеют место только обратимые процессы) до недопустимых (при которых происходят необратимые процессы). Выбранные значения воздействующих факторов должны быть такими, чтобы за время испытаний наступили отказы тех потенциально ненадежных ЭС, на качество которых на более ранних этапах жизненного цикла отрицательно повлияли субъективные факторы. В то же время выбранные значения должны быть такими, чтобы после их воздействия на испытываемые ЭС, разработанные без ошибок (без влияния субъективных факторов), технический ресурс этих ЭС вырабатывался не более чем на 10%.

Наиболее эффективно выявить потенциально ненадежные ЭС позволяют удары, тепло, влага и электрические нагрузки. Испытания на вибрацию можно рассматривать как средство контроля качества ЭС после сборки. При испытаниях на вибрацию вероятность обнаружения неустойчивости работы электрической схемы, ослабленных и треснувших частей конструкции, дефектов монтажа выше, чем при испытаниях на воздействие любых других внешних факторов. Однако при выборе значения вибрационной нагрузки следует проявлять известную осторожность, так как интенсивная вибрация может привести к разрушению некоторых хрупких элементов.

Большое число протекающих в элементах физической структуры процессов ускоряется воздействием либо температуры, либо электрических нагрузок. При этом учитывают механизмы старения и развития отказа. При определенных достаточно высоких значениях указанных факторов механизм старения может не изменяться, однако интенсивность самого процесса существенно возрастает. Это обстоятельство используют для составления программ ускоренных испытаний.

При физическом подходе к определению условий испытаний ЭС и воздействующих на них факторов необходимо учитывать все элементы физической структуры ЭС, принимая во внимание деградационные процессы в них и ускоряющие эти процессы объективные факторы. Например, такой анализ может быть проведен для ИС, которую можно представить состоящей из элементов со свойственными им показателями надежности (рисунке 2.5).

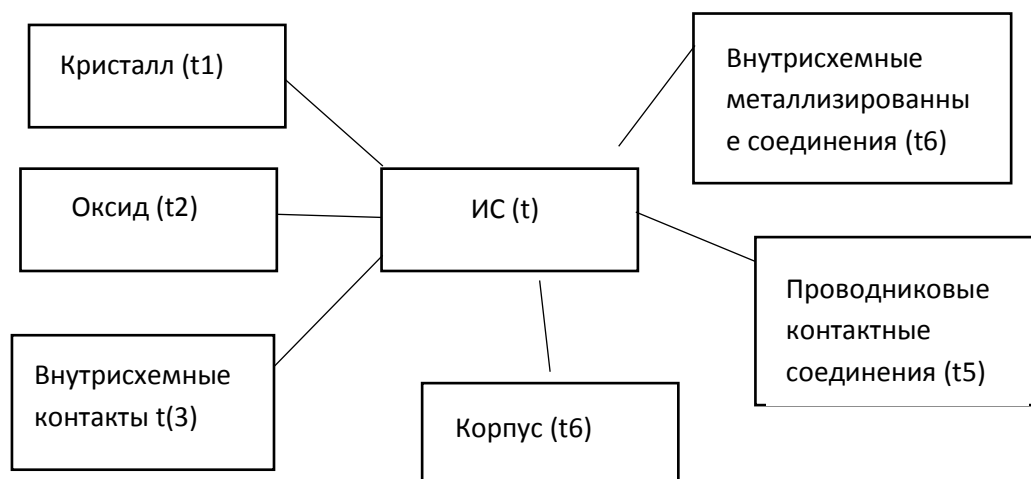


Рисунок 2.5 – Элементы физической структуры ИС со свойственными им показателями надёжности:

t и t_1-t_6 время наработки (ч) до отказа ИС и соответствующих конструктивных элементов

По характеру воздействующих на ЭС факторов можно выделить испытания с парциальным и комплексным воздействием объективных факторов. В том случае, когда ЭС характеризуется существенно меньшим запасом прочности (механической, электрической, тепловой), для установления его надёжности применяется парциальное воздействие того фактора, который приводит к значительному снижению прочности. Если же ЭС несущественно различаются по запасу прочности, а смена факторов во время эксплуатации не приводит к выделению доминирующего процесса деградации, целесообразно проводить комплексное воздействие нескольких факторов. Это необходимо также в тех случаях, когда воздействие определяющего фактора совместно с другими эффективнее его одиночного воздействия. Примером комплексного воздействия могут служить испытания в «камерах космоса», где на испытываемое изделие одновременно действуют механические нагрузки (вибрации и удары), тепловые и радиационные потоки.

В ряде случаев ЭС представляют совокупность функционально взаимодействующих автономных электронных блоков и ячеек, сконструированных, в свою очередь, на различных электрорадиоэлементах. Все они перед сборкой и после нее, как правило, проходят испытания по своим частным программам. Для согласования частных программ готовят комплексную программу испытаний. Такое согласование необходимо для исключения неоправданного дублирования и наиболее полной систематизации результатов испытаний. Испытания, проводимые на ЭС

различной конструктивной сложности, обладают как определенными достоинствами, так и некоторыми недостатками, что учитывают при составлении комплексной ПИ. Так, проведение испытаний менее сложных в конструктивном исполнении ЭС позволяет: быстро обнаружить «слабые места» изделий; оценить качество элементов и в случае необходимости заменить их более качественными; определить причины и механизмы отказов отдельных элементов. Недостаток испытаний таких ЭС – невозможность оценки некоторых параметров, влияющих на совместную работу элементов.

Испытания, проводимые на более сложных в конструктивном исполнении ЭС, позволяют оценить после сборки характеристики ЭС в целом, обнаружить взаимное влияние элементов, ячеек и блоков и проверить возможность их заменяемости. К недостаткам таких испытаний относятся: невозможность оценки параметров ячеек и блоков, входящих в состав ЭС; трудности определения места отказа и замены отказавшего элемента.

Информацию о содержании той или иной ПИ, составе документации и взаимодействии подразделения главного конструктора со службой обеспечения качества и заказчиком дает карта испытаний. Такая карта представляет собой таблицу, в которой перечислены основные разделы ПИ и общие требования к ним. Примером карты основных видов испытаний на ВВФ, осуществляемых на этапе разработки, служит таблица 2.2.

Таблица 2.2 – Карта основных видов испытаний на воздействие внешних факторов, проводимых на этапе разработки изделий

Наименование раздела программы испытаний	Вид испытаний		
	Исследовательские доводочные	Контрольные предварительные	Контрольные приёмочные
Цель испытаний	Оценка влияния вносимых в конструкцию и технологию изготовления изделия изменений для достижения заданных значений показателей качества	Определение возможности предъявления на приёмочные испытания	Решение вопроса о постановке изделия на производство или использование его по назначению
Объём испытаний	Определяется главным конструктором	Определяется НТД	Определяется НТД
Объект испытаний	Макетные изделия	Экспериментальный образец, изготовленный в опытном производстве	Изделия опытной партии
Техническая документация	Лабораторные эскизы; техническая записка о проведении испытаний	Утверждённая конструкторская документация	Утверждённая конструкторская документация, ТУ, методика испытаний
Контроль	Регистрация в журнале всех изменений,	Оформление изменений в установленном	Оформление изменений в установленном

Наименование раздела программы испытаний	Вид испытаний		
	Исследовательские доводочные	Контрольные предварительные	Контрольные приёмочные
	вносимых в конструкцию изделия	порядке для опытного производства	порядке для опытного производства
Методика испытаний	Определяется заданием на испытание или вырабатывается по указанию главного конструктора изделия	В соответствии с НТД	В соответствии с НТД, уточнённой изготовителем по согласованию с заказчиком
Документация на испытательное оборудование	Не требуется	Всё испытательное оборудование аттестовано	Всё испытательное оборудование аттестовано
Участие представителя службы обеспечения качества в испытаниях	Не участвует	Участвует в качестве члена бригады, проводящей испытания	Проводит испытания
Отчёты об испытаниях	Служебная рабочая тетрадь и технический отчёт	Отчёт, содержащий все данные об испытаниях	Сводка результатов испытаний и краткие выводы
Участие представителя заказчика	Не требуется	Контролирует методику испытаний, согласует отчёты испытаний	Контролирует и согласует программы и методики, участвует в приёмке опытной партии, согласует отчёт по испытаниям
График проведения испытаний	Утверждается главным конструктором изделия	Контролируется плановой службой обеспечения качества	Контролируется плановой службой и представителем заказчика

2.6. Методика испытаний

Одна из задач, решаемых при подготовке испытаний, – разработка и выпуск методики испытаний. *Методика испытаний* (как и ПИ) – это организационно-методический документ, обязательный к выполнению. В нем сформулированы: метод испытаний, средства и условия испытаний; порядок отбора проб; алгоритмы выполнения операций по определению одной из нескольких взаимосвязанных характеристик испытываемого изделия; формы представления и оценки точности, достоверности результатов; требования техники безопасности и охраны окружающей среды. Методика испытаний определяет процесс их проведения. Она может быть изложена в самостоятельном документе или в ПИ. Методика является также составной частью НТД (стандарты, ТУ) на изготавливаемые ЭС.

Воспроизводимость результатов испытаний определяется качеством методики испытаний и свойствами объекта испытаний. При оценке погрешностей результатов испытаний очень важно выделить погрешности, обусловленные методикой. Поэтому основное требование к методике – обеспечение максимальной эффективности процесса.

Испытаний и минимальных погрешностей результатов. Общие требования к методике испытаний включают требования к методу испытаний, техническим средствам и условиям проведения испытаний. Выбор метода – наиболее ответственный момент при разработке методики испытаний.

Метод испытаний – совокупность правил применения определенных принципов и средств для реализации испытаний, позволяющих обеспечить проверку изделий на соответствие требованиям НТД. При выборе метода учитывают конструктивно-технологические особенности изделий, нормы контролируемых параметров и заданной точности их измерения, требования безопасности проведения испытаний.

В методах испытаний конкретных ЭС должно быть предусмотрено воздействие на изделия объективных факторов (прямых и косвенных) по нормам, установленным НТД. Для большинства испытаний воздействующие факторы и их значения разбивают по степеням жесткости, соответствующим различным условиям эксплуатации ЭС. При этом учитывается возможность возникновения в элементах физической структуры деградационных процессов или известных механизмов отказов.

Все испытания должны обеспечивать минимальные затраты при максимальном техническом эффекте. Эффективность испытаний повышается при использовании методов, в которых автоматически поддерживаются испытательные режимы. Экономический анализ испытаний показал преимущество неразрушающих методов, особенно актуальных для невосстанавливаемых ЭС, функциональная сложность, а, следовательно, и стоимость которых значительны.

При выборе методов испытаний, применяемых на различных этапах создания ЭС, необходимо учитывать, что допустимые нормы на параметры отличаются на ранних и поздних периодах жизненного цикла изделий. При этом устройства для испытаний должны быть выполнены в полном соответствии с требованиями Единой системы конструкторской документации и своевременно аттестованы. Аттестация их предусматривает определение нормированных точностных характеристик, проверку их соответствия НТД и установление пригодности к работе.

В методике испытаний предусмотрено описание следующих этапов процесса испытаний: проверки устройств для испытаний, подготовки изделий к испытаниям, совместной проверки устройств для испытаний и испытываемого изделия, регистрации результатов испытаний и данных об условиях их проведения.

Проверка устройств для испытаний и подготовка их к испытаниям имеют решающее значение для успешного проведения последних. По техническим возможностям устройства для испытаний должны соответствовать этапам жизненного цикла испытываемого изделия. При этом требования к характеристикам этих устройств повышаются по мере перехода от этапа проектирования ЭС к эксплуатации. Устройства, удовлетворительно обеспечивающие проведение испытаний на этапе проектирования, не могут быть применены на последующих этапах без учета требуемой точности измерений и заданной точности поддержания значений воздействующих факторов.

По результатам измерений параметров испытываемого изделия устанавливают соответствие характеристик изделия ТУ, воспроизводимость полученных результатов (показатель стабильности производственного процесса), необходимость принятия мер по устранению недостатков производственного процесса или конструкции изделия и т. д. Поэтому должна быть обеспечена высокая точность показаний устройств для испытаний, что достигается периодическим проведением калибровки.

Подготовка изделий к испытаниям включает выбор параметров, характеризующих качество изделий, их внешний осмотр и измерение параметров качества. Изделия контролируют по функциональным и физическим параметрам, а также по внешним признакам. При выборе параметров, подлежащих измерениям и контролю в процессе испытаний, необходимо исходить из требований их максимальной информативности, чувствительности к воздействиям и объективной оценки качества испытываемых ЭС.

Полученные в процессе испытаний закономерности изменения информативных параметров могут быть положены в основу методов прогнозирования состояния изделий в условиях эксплуатации.

Рациональный выбор ограниченного числа информативных параметров, критичных к воздействию объективных факторов, сокращает объем измерений при испытаниях, а, следовательно, и стоимость испытаний в целом. Критерием выбора информативного параметра является соответствие изменения его значений во время испытания основному процессу деградации, приводящему к отказу.

Перед началом испытаний отобранные изделия следует выдержать в нормальных⁸ климатических условиях в течение времени, необходимого для стабилизации значений параметров – критериев годности. Внешний осмотр

⁸ Под нормальными климатическими условиями понимают условия, которым соответствует температура воздуха $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$, относительная влажность 45-75%, давление окружающей среды $(0,86 \dots 1,06) \cdot 10^5 \text{ Па}$.

изделий и первоначальные измерения их параметров целесообразно проводить в нормальных условиях. Данные первоначальных измерений и контроля внешнего вида необходимо анализировать, чтобы установить соответствие параметров изделий требованиям НТД и отметить особенности каждого изделия (дефекты внешнего вида, неустойчивость электрических параметров).

Нередки случаи, когда в соответствии с ПИ требуется распределить образцы по партиям, группам, подгруппам. Такое распределение производят случайным методом. Все изделия до постановки их на испытание следует промаркировать. Способ маркировки должен обеспечивать устойчивость сделанной записи и не влиять на Качество маркируемого изделия.

Совместная проверка устройств для испытания и испытываемого изделия должна показать, выполняют ли устройства свои функции при испытании изделия, не повреждаются ли устройства при возможных перегрузках в процессе испытаний, а испытываемые изделия – вследствие несогласованности их параметров с параметрами устройств для испытаний. Такая проверка имеет особенно важное значение, если устройства впервые применяют для испытания этих изделий.

Проверку устройств для испытаний ЭС выполняют либо с макетным образцом изделия, либо с самим изделием. В результате проверки убеждаются в том, что с их помощью можно измерять и контролировать все требуемые по НТД параметры испытываемого изделия в установленной последовательности и с заданной точностью. Параметры устройств измеряют сначала без объекта испытания (при последовательном включении всех частей испытательной системы), а затем с ним. Во время этих испытаний проверяют методику калибровки устройств с внесением в нее поправок в ходе испытаний, что позволяет в дальнейшем избежать повреждения дорогостоящих изделий в процессе испытаний и получения неточных результатов.

Методика проверки устройств для испытаний совместно с испытываемыми изделиями должна содержать определенные правила по расположению или закреплению испытываемых образцов на испытательном стенде. Например, испытываемое изделие не должно подвергаться воздействию прямого излучения от нагревательных элементов камеры (если в НТД не предусмотрено испытание воздействием прямого излучения).

Способ крепления изделия для проведения испытаний и физические свойства деталей крепления должны быть указаны в НТД на изделие с учетом возможных положений изделия при эксплуатации. Изделия, имеющие амортизаторы, следует испытывать с ними.

При испытаниях ЭС с целью изучения деградиационных процессов параметры образцов измеряют после выдержки в нормальных климатических условиях; время выдержки должно обеспечивать стабилизацию параметров. При изучении обратимых процессов выдержка образцов в нормальных условиях не рекомендуется. Измерение параметров должно производиться в одной и той же заранее установленной последовательности.

Для *регистрации результатов испытаний* следует вести записи в развернутой форме, давать подробное описание выполняемых регулировок, операций с переключениями, схем расположения приборов и монтажных схем. Такая запись, гарантирующая регистрацию всех входных и выходных данных с указанием единиц измерения, приведенных к одной системе, должна включать: перечень параметров, характеризующих окружающие условия (температура, влажность, запыленность); даты регистрации; сведения о лицах, проводящих испытания; описание точной конфигурации испытываемого изделия; сведения о критериях приемки или браковки в случае приемосдаточных испытаний.

2.7. Классификация и анализ отказов ЭС

Отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния изделия. Физико-химические процессы, приводящие к отказам изделий, называют обычно механизмами отказов. Критерии отказов (например, максимально допустимое значение параметра, при превышении которого изделие считается отказавшим) устанавливаются НТД на данное изделие. Отказы делятся на внезапные, постепенные и перемежающиеся.

Внезапный отказ характеризуется скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров изделия. Внезапные отказы связаны с недостатками конструкции изделия, а также с неотработанностью или нарушениями ТП. Они проявляются в изменении электрической и механической прочности изделия и приводят к его разрушению. Поэтому внезапные отказы часто называют катастрофическими. Эти отказы обычно не поддаются прогнозированию и при отсутствии резервирования ведут к отказу ЭС.

Постепенный отказ характеризуется постепенным изменением во времени одного или нескольких контролируемых параметров изделия. Он возникает в результате отклонения значений этих параметров от ранее установленной нормы, которая называется критерием годности. Как уже

указывалось, годность изделия оценивается по параметрам – критериям годности. Постепенные отказы часто называют условными, так как при одном и том же значении критерия годности они в одном случае могут приводить к потере работоспособности объекта, в котором применяется изделие, а в другом – не влиять на нее. В связи с тем, что постепенные отказы характеризуются закономерным изменением параметра за время, предшествующее отказу, они могут быть заранее предсказаны.

Перебегающие отказы, возникающие в изделии при приложении к нему внешних воздействий и исчезающие после их снятия, часто встречаются в практике наряду с внезапными и постепенными отказами. Например, в полупроводниковых приборах при воздействии внешних нагрузок перебегающий отказ проявляется в кратковременном повышении сопротивления между двумя электродами, что приводит к уменьшению тока (вплоть до его исчезновения), протекающего через контролируемую цепь; после снятия нагрузок исходная проводимость восстанавливается. Перебегающие отказы выявляют в процессе механических и климатических испытаний ЭС в электрическом режиме. При механических испытаниях нагрузками для выявления этих отказов служат вибрация и многократные удары, а при климатических – термические нагрузки.

В зависимости от стадии жизненного цикла изделия, на которой следует устранить причину отказа, все отказы разделяют на *конструкционные, производственные и эксплуатационные*; возникают они соответственно в результате нарушения установленных правил (условий): конструирования изделий или его элементов, ТП изготовления изделия или его элементов, эксплуатации изделия. Такое разделение позволяет регулировать правовые взаимоотношения между изготовителем и потребителем изделий по вопросу качества выпускаемой продукции. Те же отказы, которые по причинам их возникновения не могут быть отнесены ни к одному из указанных видов, следует учитывать отдельно, чтобы изготовитель обратил внимание на повышение надежности конкретных изделий.

С увеличением надежности ЭС уменьшается число отказов, а следовательно, и объем информации о Недостатках ТП изготовления, необходимый для организации обратной связи. Поэтому в программе обеспечения качества особое значение приобретает анализ отказов. При этом на этапах производства, испытаний и эксплуатации устанавливают виды отказов и обобщают данные по отказам для изучения их количественных изменений во времени и для классификации. На основании полученных сведений строят гипотезы о механизмах и причинах отказов, разрабатывают

рекомендации по устранению этих причин.

Анализ отказов составляет основу физического подхода к проблеме надежности. Он должен быть отработан и систематизирован. Эта задача усложняется при использовании в качестве элементной базы ИС, поскольку для проведения анализа отказов в этом случае необходимо выполнить большой объем измерений и исследований, привлекая широкий круг специалистов, а, следовательно, затрачивая значительное время на выработку окончательного решения. Между тем условия производства требуют оперативного принятия мер, по уменьшению вероятности отказов обнаруженного вида. Для устранения этого противоречия анализ отказов в случае применения ИС разбиваются на два этапа: первичный и вторичный

При первичном анализе определяют признаки отказов, выявляют отказавшие элементы ЭС, устанавливают виды и причины отказов и составляют рекомендации по устранению этих причин или по проведению вторичного анализа. Схематически методика проведения первичного анализа отказа ИС показана на рисунке 2.6. По представленной методике получают полный объем первоначальных данных об отказах, который для более простых образцов ЭС может быть сокращен за счет исключения отдельных операций анализа. Первичный анализ обычно занимает несколько суток. Он не всегда позволяет окончательно установить причину отказа, однако, как правило, обеспечивает получение необходимой первичной информации (например, каким отказом следует заниматься в первую очередь и на какой операции ТП искать его причину). Чтобы наиболее полно раскрыть причинно-следственные связи отказов, проводят их вторичный анализ.

Вторичный анализ – это процесс исследования причин и механизмов отказов ЭС с привлечением статистических, физических и физико-химических методов. В результате его проведения выявляют механизмы отказов и составляют их физические модели, уточняют причины отказов и вырабатывают рекомендации по устранению этих причин. Объектами вторичного анализа могут являться отказавшие ЭС, ТП их изготовления, режимы и условия применения изделий, а также режимы и условия приемочных испытаний. Формализовать вторичный анализ отказов очень сложно, поэтому его осуществляют по специально разработанным программам, в которых оговаривают цель, методы и сроки выполнения анализа. Некоторые методы и средства вторичного анализа для ИС приведены на рисунке 2.7.

Первый этап (неразрушающие методы исследований)



Рисунок 2.6 – Методика проведения первичного анализа отказов ИС



Рисунок 2.7 – Ориентировочная методика проведения вторичного анализа отказов

Анализ причин отказов ЭС позволяет разрабатывать методики обнаружения и предупреждения дефектов. На базе первичного и вторичного анализов создают классификационные схемы отказов (рисунок 2.8).

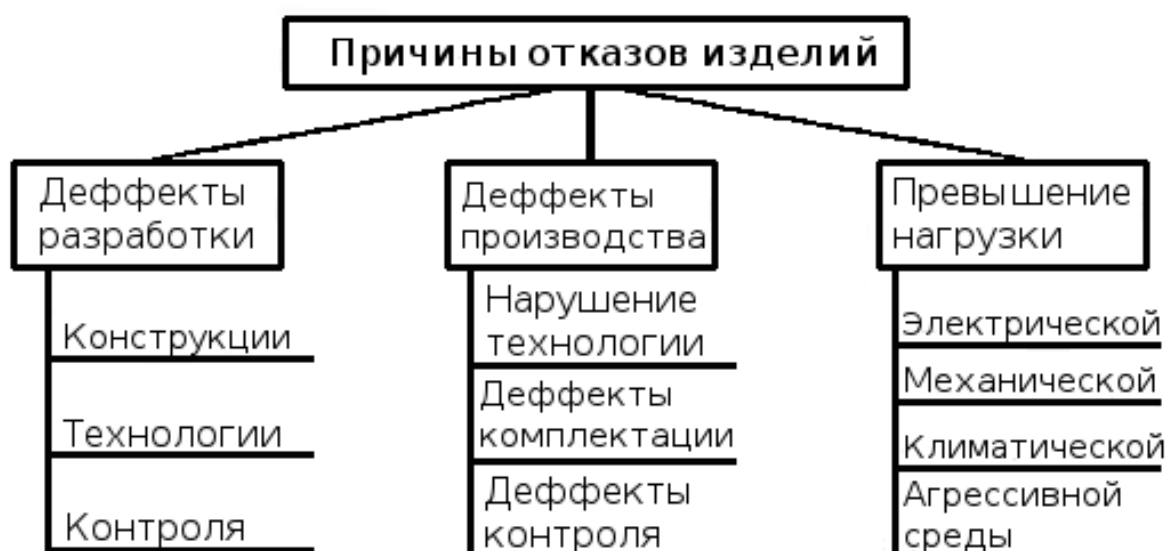


Рисунок 2.8 – Классификационная схема причин отказов

Наиболее сложным в техническом отношении является анализ эксплуатационных отказов, которые выполняют в такой последовательности: учитывают все виды отказов ЭС у различных потребителей, чтобы выяснить, как влияют на них различные условия применения изделий; проводят физическое моделирование отказов ЭС, воспроизводя физические воздействия, эквивалентные реальным воздействиям, которые могут иметь место в процессе изготовления и испытаний ЭС; анализируют ТП изготовления ЭС. Для получения объективной информации о причинах эксплуатационных отказов ЭС необходимы организация хорошей связи изготовителя с потребителем и внедрение единой формы учета неисправностей и анализа отказов. При этом потребитель обязан: сообщать подробные сведения о характере отказов, условиях их возникновения, продолжительности исправной работы отказавших изделий; высылать изготовителю без задержки вышедшее из строя изделие для последующего анализа, поскольку, как показывает практика, при длительном хранении отказавших изделий может произойти изменение или самоустранение некоторых видов отказов, что, в свою очередь, приведет к потере информации о физике отказов.

Установление истинных причин и механизмов отказов позволяет оптимизировать конструкции изделий, ТП их изготовления и нагрузки на изделия с целью устранения или сокращения числа определенных видов отказов.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под «практически невозможным» и «практически достоверным» событиями?
2. Назовите генеральные и выборочные характеристики, применяемые при контроле качества продукции.
3. В каких практических случаях при контроле и испытании ЭС приходится сталкиваться с композицией и суперпозицией распределений?
4. Каков смысл оперативной характеристики и в чем заключается риск поставщика и заказчика при сдаче готовой продукции?
5. Каковы принципы классификации испытаний ЭС?
6. В чем отличие стендовых и лабораторных испытаний ЭС от их реальной эксплуатации?
7. Какие испытания ЭС с использованием моделей Вы знаете?
8. Как определяют область безотказной работы ЭС?
9. Какие испытания в зависимости от их назначения Вам известны? Каковы цели этих испытаний?
10. Совокупностью, каких свойств характеризуется надежность ЭС?
11. В чем преимущества последовательно-параллельного способа проведения испытания?
12. Каковы основные разделы программы испытаний и их характеристики?
13. Каковы основные принципы выбора воздействующих факторов при испытании ЭС?
14. В чем состоит сущность физического подхода к выбору воздействующих факторов?
15. В чем состоит подготовка изделий к испытаниям согласно методике испытаний?
16. По каким принципам классифицируют отказы ЭС? Какие виды отказов Вы знаете?
17. Чем вызвана необходимость проведения первичного и вторичного анализов отказов ЭС?

Глава 3

ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.1. Общие сведения

Существуют следующие виды механических испытаний:

- на обнаружение резонансных частот конструкции ЭС и проверку отсутствия их в заданном диапазоне частот;
- на виброустойчивость и вибропрочность;
- на ударную прочность и ударную устойчивость;
- на воздействия одиночных ударов, линейного ускорения и акустического шума.

Все механические испытания ЭС проводят при нормальных климатических условиях под электрической нагрузкой или без нее. Повышение температуры окружающего воздуха при испытаниях за счет выделения тепла стендом и ЭС допускается при условии, что она не превысит верхнего значения рабочей температуры среды, заданного в НТД на ЭС; при этом допускается обдув стендов.

Способ крепления ЭС при механических испытаниях указывается в НТД и программе испытаний на изделие с учетом возможных вариантов его расположения при эксплуатации. Однако для обеспечения эффективного контроля стабильности производства и выявления устойчивости ЭС к соответствующему виду механических воздействий допускается использовать и другие способы крепления. Изделия, имеющие собственные амортизаторы, следует крепить на них. Время выдержки в заданном режиме отсчитывают, как правило, с момента достижения параметров испытательного режима.

Исследования показали, что наибольшее влияние на ЭС оказывает сочетание вибрационных нагрузок и одиночных ударов. Поэтому испытания на указанные воздействия проводят в первую очередь. Испытания на остальные механические воздействия являются дополнительными. Так, испытания на воздействие акустических шумов позволяют выявить те дефекты ЭС, которые не удастся обнаружить при воздействии вибрации из-за влияния амортизирующих свойств конструкции изделия и его крепления.

Виды механических испытаний и их последовательность указаны в программе испытаний и зависят от назначения ЭС, условий эксплуатации,

типа производства. Например, в программу определительных испытаний опытного образца и образцов установочной серии обычно включают все виды механических испытаний, а для образцов, изготавливаемых в серийном производстве, т. е. периодически испытываемых, – только испытания, предусмотренные в стандартах и ТУ на ЭС.

Надежная работа ЭС обеспечивается благодаря наличию конструктивных запасов по вибропрочности, виброустойчивости, резонансной частоте и другим характеристикам. Конструктивный запас ЭС по резонансной частоте оценивают с помощью коэффициента конструктивного запаса

$$K_3 = f_{он} / f_в ,$$

где $f_{он}$ – наименьшая резонансная частота испытываемого изделия; $f_в$ – верхняя частота рабочего диапазона, заданная в НТД.

Из приведенной формулы видно, что чем выше значение $f_{он}$, тем больше K_3 , а следовательно, выше вибропрочность при равных рабочих условиях.

3.2. Виды вибраций

В зависимости от характера колебаний ЭС различают детерминированную и случайную вибрации.

Детерминированная вибрация изменяется по периодическому закону, если функция $x(t)$, описывающая ее, изменяет значения через одинаковые интервалы времени $x(t)$ (периоды колебания) (рисунок 3.1, а). Кривая $x(t)$ в этих интервалах имеет произвольную форму. Разновидностью периодической вибрации является *гармоническая*, при которой кривая $x(t)$ изменяется с течением времени по синусоидальному закону (рисунок 3.1, б). В практике испытаний гармоническую вибрацию часто называют *синусоидальной*. Если начальной фазой колебаний пренебрегают, то для гармонической вибрации справедливо уравнение

$$x(t) = A \sin(\omega t)$$

где $x(t)$ – смещение от положения равновесия в момент t ; A – амплитуда смещения; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

Спектр такой вибрации (рис. 3.1, б) состоит из одной составляющей $f = 1/T$.

Периодическое колебание может быть представлено как сумма ряда

гармонических колебаний с различными амплитудами и частотами (рисунок 3.1, в).

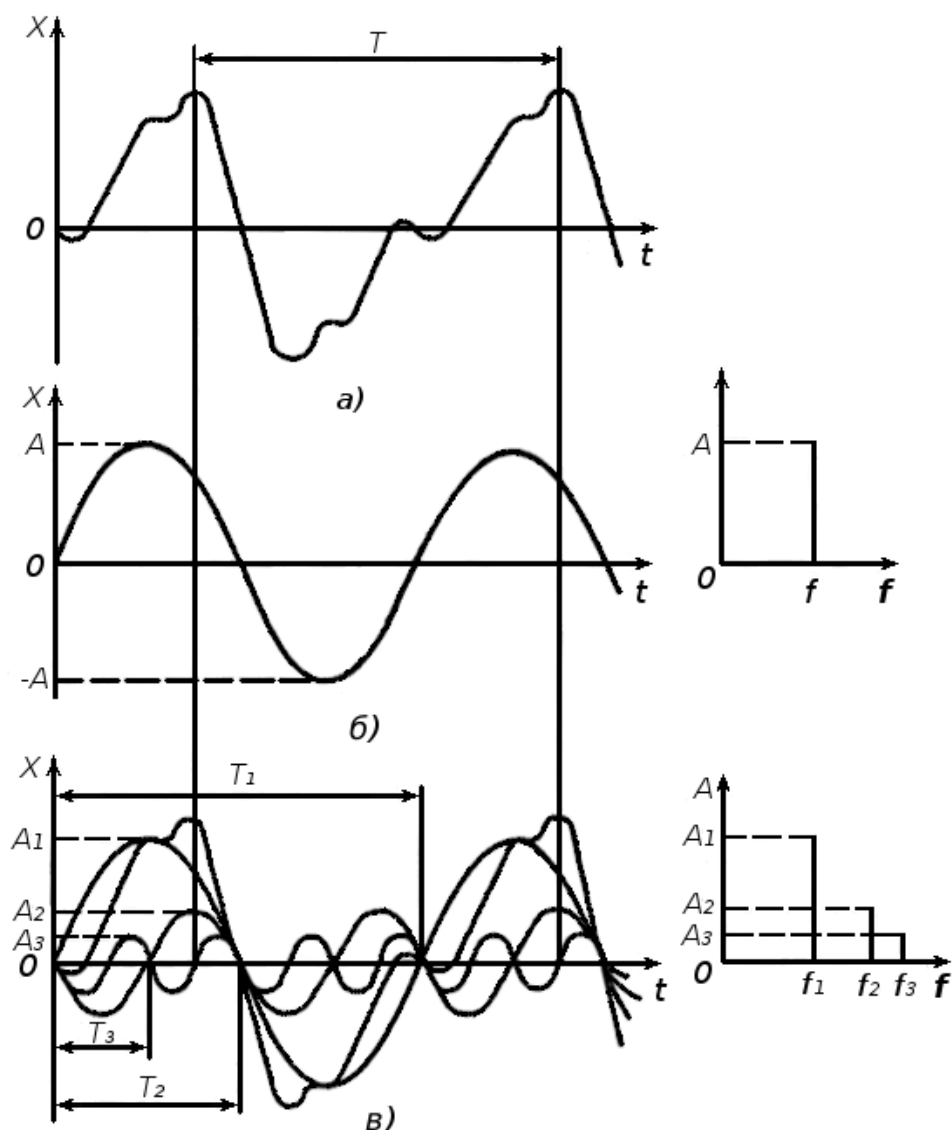


Рисунок 3.1 – Периодическая вибрация (а) гармоническая вибрация и ее спектр частот (б); периодическая вибрация как сумма гармонических колебаний и ее спектр частот (в)

Аналитически это выполняется путем разложения периодического колебания в ряд Фурье – сумму бесконечного числа гармонических составляющих с амплитудами A_k и частотами kf , т.е.

$$x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(2\pi k f t),$$

где k – номер гармоники; A_k – амплитуда k -й гармоники.

В связи с этим периодическое колебание часто называют полигармоническим. Частоты всех гармоник кратны основной частоте

$f_1 = 1/T_3$ периодического колебания, имеющего дискретный (линейчатый) спектр (рисунок 3.1, в).

На практике наиболее распространенной является периодическая вибрация. Периодическую вибрацию с небольшими нелинейными искажениями часто относят к гармоническим колебаниям. Степень искажения можно подсчитать с помощью коэффициента гармоник (коэффициента нелинейных искажений)

$$K_H = \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_4^2 + \dots}{A_1^2}},$$

где A_i – амплитуда i -й гармоники.

Случайная вибрация в отличие от детерминированной не может быть описана точными математическими соотношениями. По виду такой вибрации (рисунок 3.2) невозможно точно предсказать значения ее параметров в ближайший момент времени. Однако можно с определенной вероятностью предсказать, что мгновенное значение $x(t)$ вибрации попадает в произвольно выбранный интервал значений от x_1 до $x_1 + \Delta x$. Как видно из рисунка 3.2, эта вероятность

$$P[x_1 \leq x(t) \leq x_1 + \Delta x] = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \right),$$

Где $\sum_{i=1}^n \Delta t_i$ – суммарная продолжительность нахождения амплитуды

вибрации в интервале от x_1 , до $x_1 + \Delta x$ за время наблюдения τ .

При $\tau \rightarrow \infty$ отношение в правой части приведенного уравнения все более точно описывает вероятность события. Учитывая, что эта вероятность зависит от ширины интервала Δx , для описания непрерывной случайной величины X удобнее пользоваться плотностью вероятности

$$f(X) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P[x_1 \leq x(t) \leq x_1 + \Delta x]}{\Delta x}.$$

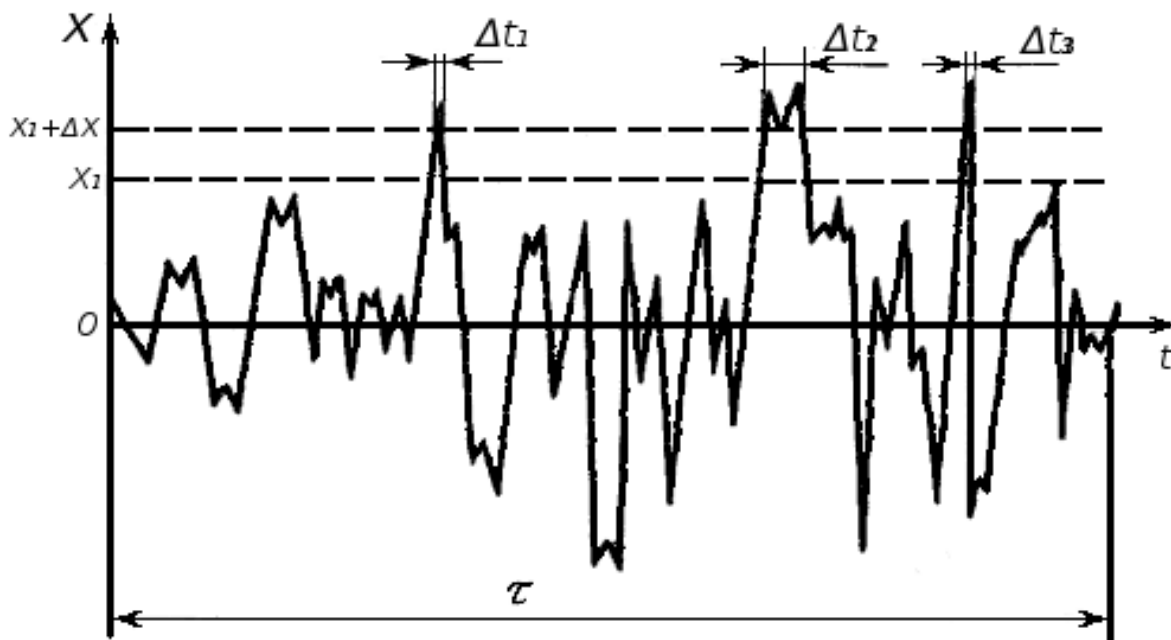


Рисунок 3.2 – Случайная вибрация

Вид функции плотности вероятности характеризует закон распределения случайной величины. Так как случайную вибрацию можно рассматривать как сумму множества независимых и мало отличающихся мгновенных случайных воздействий, то в соответствии с центральной предельной теоремой распределение такой вибрации подчиняется закону Гаусса. В этом случае вибрацию можно характеризовать математическим ожиданием и генеральной (или выборочной) дисперсией. Математическое ожидание $M[X]$ представляет собой среднее арифметическое мгновенных значений случайной вибрации за время наблюдения, а генеральная дисперсия σ^2 – разброс мгновенных значений случайной вибрации относительно ее среднего значения.

Однако возможны случаи, когда колебательные процессы с одинаковыми значениями $M[X]$ и σ^2 отличаются друг от друга за счет различной частоты, т. е. растянутости их вдоль оси времени. Поэтому удобнее исследовать случайную вибрацию с помощью метода частотного анализа, позволяющего описывать случайный процесс не во временной, а в частотной области. В связи с этим целесообразно рассматривать случайную вибрацию как сумму бесконечно большого числа гармонических колебаний. Тогда мощность ее, называемая в данном случае спектральной мощностью, представляет суммарную мощность всех синусоидальных составляющих в рассматриваемом диапазоне частот. Спектральная мощность

пропорциональна сумме квадратов амплитуд всех синусоидальных составляющих, заключенных в пределах рассматриваемой частотной полосы.

При анализе случайной вибрации в частотной области пользуются не мгновенным значением амплитуд гармонических составляющих, а их дисперсией. Дисперсия σ^2 , отнесенная к рассматриваемой полосе частот $f = f_2 - f_1$, называется спектральной плотностью мощности случайной вибрации в этой полосе частот:

$$S(f) = \sigma^2 / f.$$

Как видно из данного соотношения, плотность характеризует мощность колебательного процесса, приходящуюся на единицу частотного диапазона. Площадь под кривой зависимости спектральной плотности от частоты равна дисперсии амплитуд гармонических составляющих. Две случайные вибрации с одинаковыми параметрами закона Гаусса могут отличаться тем, что их мощности сосредоточены в различных частотных диапазонах.

Среднее значение дисперсии случайной вибрации в интервале частот $f_1 \dots f_2$ можно измерить, подавая эту вибрацию на вход полосового фильтра с узкой полосой пропускания и усредняя возведенную в квадрат функцию на выходе фильтра.

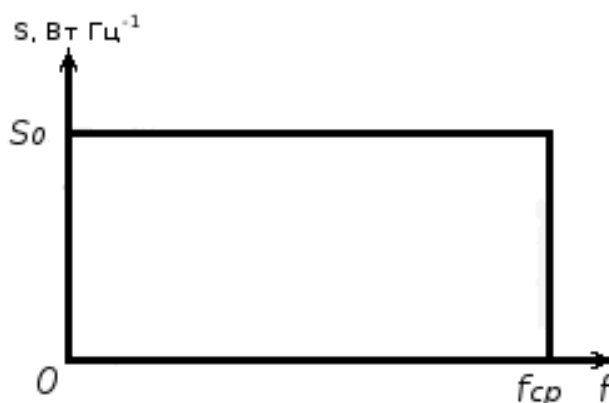


Рисунок 3.3 – Спектральная плотность мощности вибрации типа белого шума

Одной из разновидностей случайной вибрации является так называемый «белый шум» – шумовой сигнал, частотный спектр которого постоянен и равномерен, поэтому и мощность его постоянна в рассматриваемом диапазоне частот (рис. 3.3). Спектральная плотность ограниченного по частоте $f_{ср}$ белого шума

$$S(f) = \begin{cases} \sigma^2 / f_{ср} \text{ при } f \leq f_{ср}, \\ 0 \text{ при } f \geq f_{ср} \end{cases},$$

где f_{cp} – частота среза.

3.3. Обнаружение резонансных частот

При разработке новых конструкций ЭС перед испытаниями на воздействие вибраций часто проводят испытания на обнаружение резонансных частот этих конструкций. Такие испытания служат для проверки механических свойств изделий и получения исходной информации при выборе методов испытаний на вибропрочность и воздействие акустического шума, а также для выбора длительности действия ударного ускорения при испытаниях на воздействие механических ударов (одиночных и многократных). Резонансные частоты ЭС или их отдельных элементов и узлов определяют в трех перпендикулярных направлениях.

Обычно конструкции испытываемых ЭС являются сложными механическими колебательными системами, обладающими несколькими резонансными частотами. При анализе таких конструкций наибольший интерес представляют наименьшие резонансные частоты, так как на них возникают максимальные напряжения и деформации. В случае совпадения резонансной частоты элемента испытываемой конструкции с частотой возмущающей силы наступает явление резонанса, которое сопровождается увеличением амплитуды колебаний более чем в два раза и изменением их фазы на 90° .

Для определения резонансных частот изделие подвергают воздействию гармонической вибрации при пониженных ускорениях $(1...5)g$ в диапазоне частот $(0,2...1,5) f_{0p}$, где f_{0p} – расчетная резонансная частота изделия. Конкретный диапазон частот испытаний устанавливается в программе испытаний. Поиск резонансных частот производят, плавно изменяя частоту при поддержании постоянной амплитуды ускорения $(1...5)g$ или амплитуды смещения (не более 1,5 мм). Резонансную частоту ЭС определяют как среднее арифметическое значение резонансных частот, полученных при испытаниях выборки. Погрешность измерений частот должна составлять 0,5% или 0,5 Гц, причем учитывается большее значение. В тех случаях, когда регистрация резонансных колебаний элементов невозможна, резонансные частоты могут быть определены по изменению значений выходных параметров ЭС.

Пьезоэлектрический метод, являющийся наиболее отработанным, основан на пьезоэлектрическом эффекте, заключающемся в преобразовании механических колебаний в электрический сигнал, снимаемый с

пьезоэлектрического преобразователя, прикрепляемого к испытываемому образцу. Метод обеспечивает достаточную точность в том случае, когда размеры и масса испытываемого изделия в 10 раз и более превышают размеры и массу пьезопреобразователя. Схема определения резонансных частот пьезоэлектрическим методом представлена на рисунке 3.4. При плавном изменении частоты колебаний станда и поддержания постоянным ускорения крепежной платы на резонансной частоте ЭС наблюдается увеличение напряжения на пьезопреобразователе и поворот на 90° эллипса на экране осциллографа.

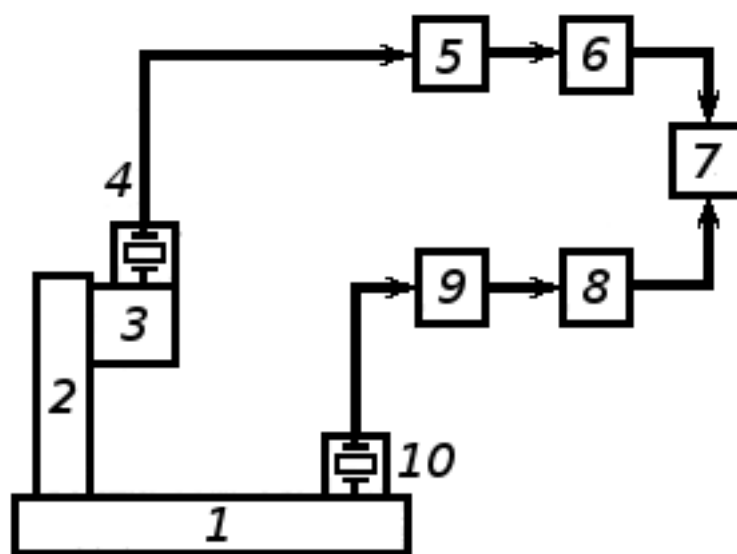


Рис 3.4 Структурная схема устройства для определения резонансных частот пьезоэлектрическим методом. 1 – стол вибростенда; 2 – приспособление для крепления изделия; 3 – испытываемое изделие; 4, 10 – пьезопреобразователи; 5, 9 – согласующие устройства; 6, 8 – измерительные устройства;
7 – осциллограф

В настоящее время растет интерес к бесконтактным методам измерения параметров вибрации, не оказывающим влияния на характеристики объекта измерения. Однолучевой оптический метод – один из них. Он основан на изменении угла сходимости лазерного луча, отраженного от поверхности вибрирующего изделия. Определение резонансной частоты данным методом поясняет рисунок 3.5.

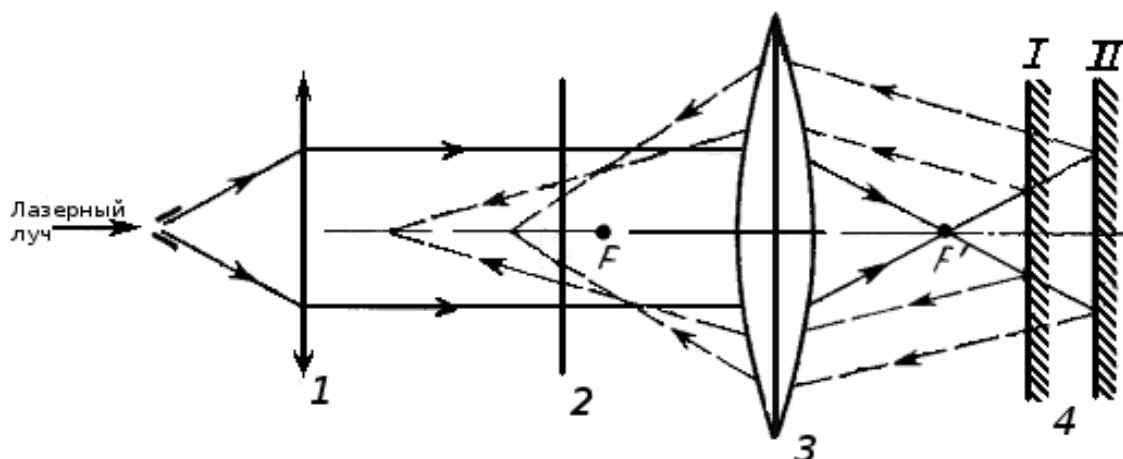


Рисунок 3.5 – Формирование отраженного светового пучка при вибрации испытываемого изделия

1 – коллиматор; 2 – экран; 3 – фокусирующая линза; 4 – поверхность испытываемого изделия; ———— – падающий луч; - - - - - – отраженный от поверхности изделия луч при нахождении ее в положении I и II; F и F' – передний и задний фокусы линзы.

Световой поток лазера, расширенный с помощью коллиматора 1, фокусируется линзой 3 в точке F' (заднем фокусе линзы) вблизи поверхности 4 испытываемого изделия, которая расположена перпендикулярно направлению распространения светового потока. Отраженный от поверхности изделия свет вновь формируется той же самой фокусирующей линзой в сходящийся световой поток, угол сходимости которого зависит от расстояния между задним фокусом линзы и отражающей поверхностью изделия. При вибрации изделия (положения I и II) это расстояние меняется и соответственно меняется диаметр отраженного светового потока, спроецированного на экран 2, а, следовательно, поверхностная плотность энергии излучения. Установив вместо экрана фотоэлектронный умножитель, на который с помощью диафрагмы пропускают только центральную часть отраженного светового потока, можно контролировать изменение его плотности энергии по регистрирующему прибору на выходе умножителя, а при соответствующей калибровке устройства – контролировать и амплитуду механических колебаний испытываемого изделия. Момент наступления резонанса определяют по резкому возрастанию амплитуды выходного сигнала.

Достоинством метода является не только простота проведения измерений, но и высокая чувствительность, которая ограничивается полосами пропускания фотоэлектронного умножителя и регистрирующей аппаратуры. Результаты испытаний, как уже отмечалось, используют для

выбора других видов механических испытаний. Так, если $f_{0H} > 1000$ Гц, то из механических испытаний исключают испытания на ударпрочность; если $[f_{0H} > 2000$ Гц, то исключают испытания на удароустойчивость; если $f_{0H} > 2 f_{\epsilon}]$, то исключают испытания на виброустойчивость.

3.4. Испытания на виброустойчивость и вибропрочность

Испытание на виброустойчивость проводят с целью проверки способности ЭС выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах значений, указанных в ТУ, в условиях вибрации в заданных диапазонах частот и ускорений. Испытание проводят под электрической нагрузкой, контролируя в процессе его параметры ЭС. Для проверки виброустойчивости выбирают такие параметры испытываемых изделий, по изменению которых можно судить о виброустойчивости (например, уровень виброшумов, искажение выходного сигнала, целостность электрической цепи, нестабильность контактного сопротивления и г. д.). Степень жесткости испытания определяется сочетанием следующих параметров (таблица 3.1):

Таблица 3.1 – Параметры, характеризующие воздействие вибрации при испытании ЭС на виброустойчивость

Степень жесткости	Диапазон частот, Гц	Амплитуда перемещения, мм	Частота перехода, Гц	Амплитуда ускорения, g
I	10...35	—	—	0,5
II	10..55	—	—	1
III	10...55	0,5	32	2
IV	10.. 55	0,5	—	—
V	10..80	0,5	32	2
VI	10..80	0,5	50	5
VII	10..150	0,5	50	5
VIII	10..200	0,5	50	5
IX	10..500	0,5	50	5
X	10..500	1	50	10
XI	10..2000	1	50	10
XII	10..2000	2	50	20
XIII	10..2000	4	50	40
XIV	10..5000	4	50	40

диапазона частот воздействия вибрации, амплитуд перемещения и ускорения,

частоты перехода – частоты, при которой происходит изменение режима испытания (от режима с постоянной амплитудой перемещения к режиму с постоянной амплитудой ускорения). Продолжительность испытания в каждом направлении воздействия определяется временем проверки работоспособности изделий.

Испытание на вибропрочность проводят с целью проверки способности изделий противостоять разрушающему действию вибрации и выполнять свои функции при сохранении параметров после механического воздействия в пределах значений, указанных в ТУ и ПИ на изделия.

Испытания ЭС на виброустойчивость и вибропрочность осуществляют методами фиксированных частот, качающейся частоты, случайной вибрации. Выбор того или иного метода испытания определяется резонансными частотами изделия: если резонансная частота изделия превышает верхнюю частоту рабочего диапазона частот более чем в 1,5 раза, проводят испытание на одной фиксированной частоте; если резонансные частоты не установлены, используют метод качающейся частоты; если испытываемое изделие имеет не менее четырех резонансов в заданном диапазоне частот – метод случайной вибрации.

Метод качающейся частоты является в настоящее время основным методом испытаний на виброустойчивость и вибропрочность. Сущность его заключается в изменении частоты вибрации в заданном диапазоне – от минимальной до максимальной и наоборот (цикл качания), с тем, чтобы последовательно возбуждать резонансы конструкции ЭС, которые приходится на область частот испытания. Необходимость не только повышения, но и понижения частоты обусловлена возможным наличием нелинейных резонансов конструкции испытываемого изделия, появление которых в значительной степени зависит от направления изменения частоты вибрации. Структурная схема испытания методом качающейся частоты приведена на рисунке 3.6.

Генератор качания частоты (ГКЧ) управляет частотой задающего генератора 1 звуковой частоты. Автоматический регулятор уровня вибрации (АРУВ) изменяет выходное напряжение генератора, а следовательно и мощность колебаний на выходе усилителя мощности 2, подводимых к подвижной катушке электродинамического вибратора 3. Таким образом, ГКЧ осуществляет компенсацию колебаний частотной характеристики, а АРУВ поддерживает необходимый уровень вибрации на столе вибратора. Этот уровень регистрируется вибропреобразователем 5. Для достижения равномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) вибратора регулятор уровня вибрации должен обеспечивать глубину

регулировки в несколько десятков децибел.

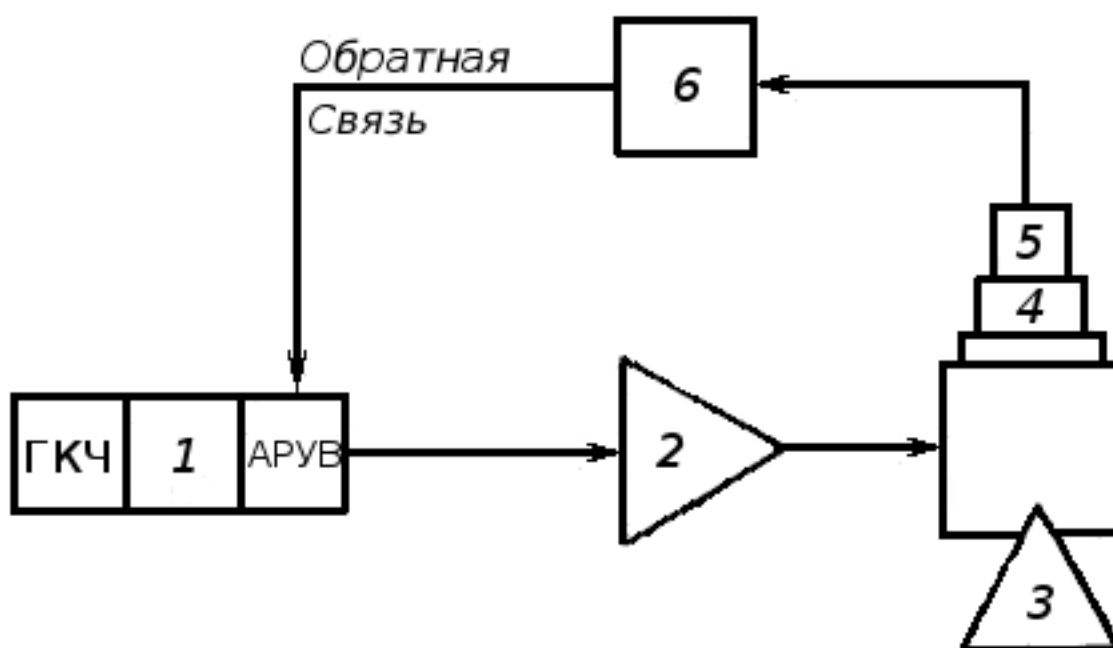


Рисунок 3.6 – Структурная схема устройства для испытания методом качающейся частоты ГКЧ – генератор качания частоты; АРУВ – автоматический регулятор уровня вибрации; 1 – задающий генератор; 2– усилитель мощности; 3 – вибратор; 4 – испытываемое изделие, 5 – виброизмерительный преобразователь; 6 – виброизмерительная аппаратура

При испытании ЭС методом качающейся частоты любая резонансная частота, соответствующая диапазону частот испытания, возбуждается дважды за цикл качания. В этом состоит основное преимущество данного метода перед методом фиксированных частот. Ускорение вибрации, равное второй производной от перемещения (3.1) по времени, изменяется по закону

$$a = \ddot{x} = A_a \sin(\omega(t)t),$$

где $A_a = (2\pi f)^2 A$ – амплитуда вибрационного ускорения; $\omega(t)$ – частота, медленно меняющаяся во времени от минимального значения до максимального и обратно.

Чтобы амплитуда A_a ускорения оставалась постоянной, необходимо с изменением частоты f соответственно изменять амплитуду A перемещения стола вибростенда. При низких частотах, значения которых в зависимости от степени жесткости испытаний устанавливаются в пределах 40...70 Гц, испытание методом качающейся частоты проводят при перемещении стола

вибростенда по закону

$$x(t) = A \sin(\omega(t)t),$$

где A – постоянная амплитуда перемещения стола вибростенда.

В отличие от выражения (3.1), с помощью которого описывается гармоническая вибрация с постоянными параметрами, выражение (3.3) описывает гармоническую вибрацию с одним переменным параметром – частотой вибрации. Таким образом, испытание методом качающейся частоты на низких частотах проводят, плавно меняя частоту при постоянной амплитуде перемещения стола вибростенда.

При испытании на частотах, превышающих частоту перехода, поддерживается постоянная амплитуда A_a ускорения. Тогда в соответствии с (3.2) должна меняться (с изменением частоты) амплитуда перемещения A .

Частота вибрации в процессе испытания меняется во времени обычно по экспоненциальному закону $f = f_n e^{kt}$, где f_n – нижняя частота рабочего диапазона; k – показатель степени, характеризующий скорость изменения (качания) частоты.

Скорость качания частоты вибрации при испытании ЭС на виброустойчивость должна быть такой, чтобы время $t_{\Delta f}$ изменения частоты в резонансной полосе частот Δf испытываемых изделий удовлетворяло условию

$$t_{\Delta f} \geq t_{нар}, t_{\Delta f} \geq t_y.$$

Здесь $t_{нар}$ – время нарастания амплитуды вибрации изделия при резонансе до установившегося значения; t_y – время окончательного установления подвижной части измерительного или регистрирующего прибора. Время нарастания определяется соотношением

$$t_{нар} \cong k_1 Q / f_0,$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий значение времени $t_{нар}$ в результате отклонения изменений амплитуды вибрации от линейного закона; Q – добротность механической колебательной системы (испытываемого изделия), зависящая от количества энергии, рассеиваемой системой при вибрации; f_0 – резонансная частота. Значение k_1 рекомендуется принимать равным 2...3, а значения Q и t_0 либо измеряют, либо используют данные конструктивных аналогов испытываемых изделий.

Требуемая при испытании скорость качания частоты вибрации

$$v_K = \frac{1}{t_{\Delta f}} 200 \lg \left(\frac{2Q+1}{2Q-1} \right).$$

Время $t_{\Delta f}$ выбирают в соответствии с условием (3.4). Уменьшение скорости качания частоты приводит к увеличению продолжительности испытаний, что экономически невыгодно. При испытании ЭС на виброустойчивость обычно выбирают $v_K \leq -2$ окт./мин.⁹ Если значение v_K найденное по формуле (3.6), превышает 2 окт./мин, то v_K следует брать равным 2 окт./мин. Если же скорость $v_K < 2$ окт./мин, то ее следует округлить до ближайшего меньшего значения, которое может быть установлено на приборе управления вибрационной установкой.

Пример. Предположим, что $f_0 = 2000$ Га, $Q = 100$ и регистрацию нарушений функционирования изделия производят при помощи осциллографа с $t_y = 0,01$ с. Требуется определить скорость качания частоты вибрации.

Порядок расчета.

1. По (3.5) находим $t_{нар} = 2 \cdot 100 / 2000 = 0.1$ с.
2. Из условия (3.4) выбираем время изменения частоты в резонансной полосе частот $t_{\Delta f} = 0,1$ с.
3. В соответствии с (3.6) получаем $v_K = \frac{200 \lg(201/199)}{0.1} \cong 9 \text{ окт./с.}$
4. Согласно условию (3.7) выбираем $v_K = 2$ окт./мин.

В том случае, когда значения резонансных частот изделия неизвестны, испытание методом качающейся частоты проводят во всем диапазоне частот. Знание механических характеристик испытываемых изделий позволяет получить результаты испытания в более короткие сроки при действии вибрационной нагрузки в наиболее опасном диапазоне частот. Например, из рисунка 3.7 видно, что испытания на воздействия вибрации необходимо проводить в резонансной области II, где нагрузки (кривая 2) превышают

⁹ Октавой называют интервал между двумя частотами f_2 и f_1 , для которых выполняется условие $\frac{f_2}{f_1} = 2$

или $\log_2 \frac{f_2}{f_1} = 1$

допустимые; возможно проведение испытаний в дорезонансной области *I*, но бессмысленны испытания в зарезонансной области *III*, где ускорение ниже установленного.

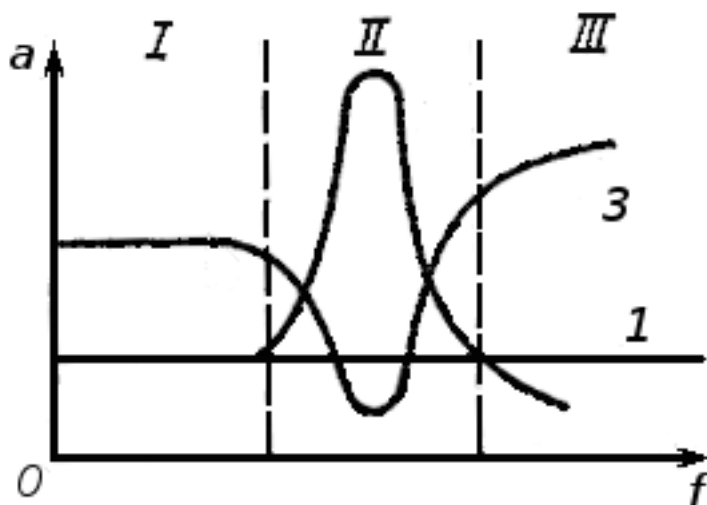


Рисунок 3.7 – Характеристика устойчивости изделий при воздействии вибрации

1 – идеальная устойчивость изделий; 2 – нагрузка при испытании; 3 – реальная устойчивость изделия; *I*, *II*, *III* – дорезонансная, резонансная и зарезонансная области частот

После испытания на виброустойчивость образцы изделий подвергают испытанию на вибропрочность, которое осуществляют, как правило, без электрической нагрузки. Однако в отличие от испытания на виброустойчивость испытание на вибропрочность проводят не за один цикл качания частоты, а за несколько. Число циклов качания зависит от заданной жесткости испытания. Так, для степеней жесткости XVI–XIX оно равно 30, а для степени жесткости XX – двум.

Если до начала испытания на вибропрочность известны значения резонансных частот испытываемого изделия, то целесообразно проводить ускоренные испытания, что позволяет сократить время и объем испытания без потери информации об испытываемом изделии. Сокращение времени испытания ЭС основано на влиянии вибрационных нагрузок на долговечность изделий по закону

$$(A_{\text{уск}} / A_a)^\lambda = \tau / \tau_{\text{уск}},$$

где $A_{\text{уск}}$ и A_a – амплитуды вибрационного ускорения при ускоренном и обычном испытаниях; $\lambda = 2 \dots 10$ – показатель степени, значение которого

зависит от особенностей конструкции и материала изделия; τ и $\tau_{уск}$ – продолжительность обычного и ускоренного испытания. Наиболее жесткому испытанию соответствует $\lambda = 2$, поскольку при этом максимальна продолжительность испытания.

С увеличением амплитуды $A_{aуск}$ ускорения вибрации необходимо следить за тем, чтобы механизм отказов испытываемых изделий оставался неизменным по сравнению с обычными условиями испытания. Для ЭС, резонансная частота конструкции которого лежит в полосе частот, соответствующей заданной жесткости, или превышает верхнее значение этой полосы, результаты испытания удастся получить в короткие сроки, сосредоточивая вибрационную нагрузку в наиболее опасном диапазоне частот. При этом необходимо точно знать резонансную частоту для правильного выбора диапазона частот испытания, который рекомендуется устанавливать в пределах $(0,75 \dots 1,4) f_0$.

Метод фиксированных частот применяют редко из-за отсутствия информации о резонансных частотах испытываемых ЭС. Но даже если перед испытанием установить частоту, равную известной резонансной частоте изделия, в процессе испытания может произойти ее смещение в сторону уменьшения, что приведет к снижению эффективности испытания. Ввиду малой информативности данного метода испытаний обычно устанавливаемая их длительность в полтора раза превышает длительность испытаний методом качающейся частоты. Метод фиксированных частот применяют в тех исключительно редких случаях, когда проведение испытаний методом качающейся частоты технически неосуществимо, например, при отсутствии соответствующего испытательного оборудования.

В реальных условиях эксплуатации на ЭС воздействуют, как правило, не одиночные гармонические колебания, а колебания со сложным спектром частот, чему в большей степени соответствуют испытания ЭС на воздействие случайной вибрации. Такое испытание может быть выполнено методами широкополосной случайной вибрации и узкополосной случайной вибрации со сканированием полосы частот.

Метод широкополосной случайной вибрации (ШСВ).

При использовании метода ШСВ предусматривается постоянная плотность энергии каждой гармонической составляющей колебательного процесса для чего на испытываемые изделия воздействует белый шум и испытание проводят при определенных значениях среднего квадратического ускорения. Структурная схема испытания на ШСВ приведена на рисунке 3.8.

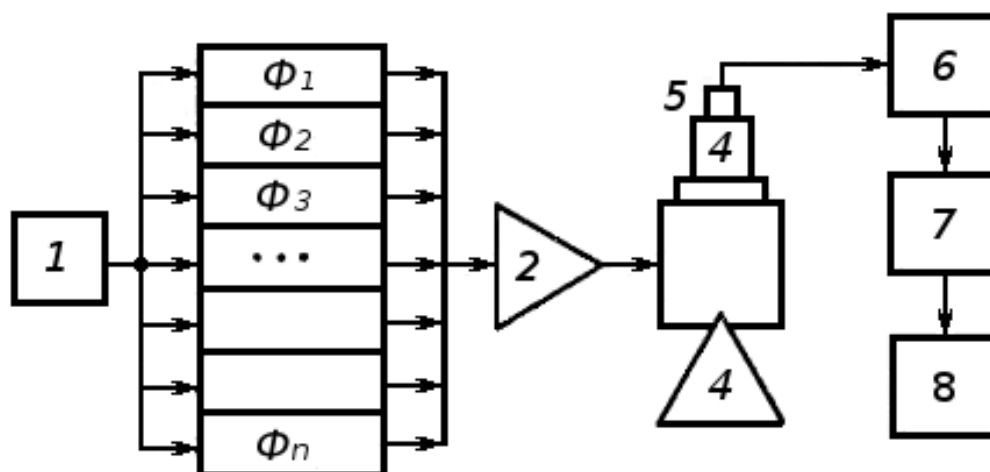


Рисунок 3.8 – Структурная схема испытания методом широкополосной случайной вибрации:

1 – генератор шума; 2 – усилитель мощности; 3 – вибратор; 4 – испытываемое изделие; 5 – виброизмерительный преобразователь; 6 – виброизмерительная аппаратура; 7 – регистрирующее устройство, 8 – регистрирующая аппаратура

В качестве сигнала возбуждения задающего устройства 1 используют либо белый шум (рисунок 3.3), либо сигнал из n составляющих (рисунок 3.9, а), огибаемых кривой A , изображающей желательную спектральную плотность ускорения в заданной точке на вибростоле

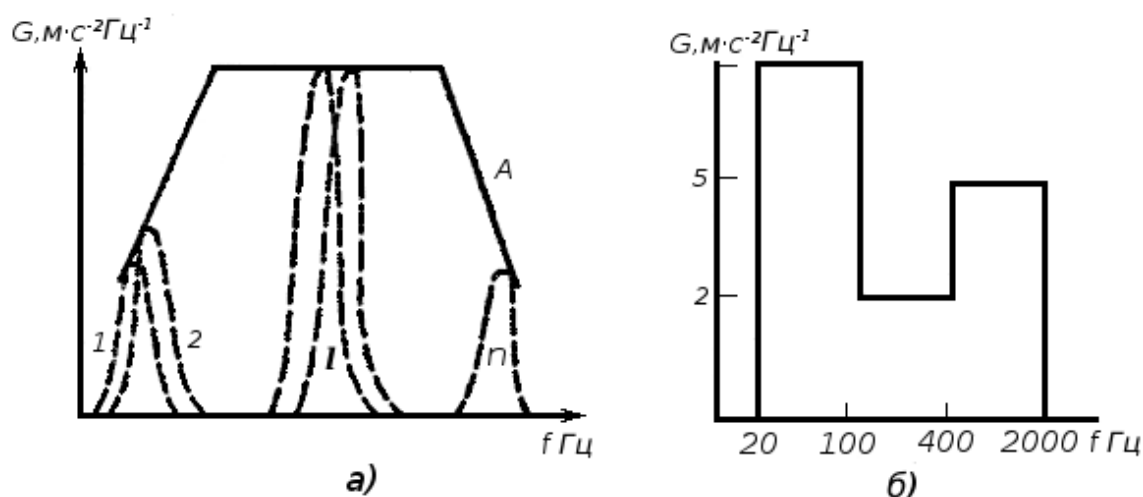


Рисунок 3.9 – График выравнивания случайного процесса (а) и заданная спектральная плотность ускорения (б)

Указанные сигналы подают на блок фильтров $\Phi_1 - \Phi_n$ (рисунок 3.8), состоящий из многочисленных узкополосных фильтров фиксированной

частоты, перекрывающих спектр частот сигнала возбуждения. Необходимое значение ускорения в узкой полосе Δf достигается интегрированием спектральной плотности ускорения по Δf . Фильтры настраивают так, чтобы получить заданную характеристику спектральной плотности ускорения вибростола с учетом компенсации неравномерности АЧХ вибратора и приспособления для крепления. Программа испытания задается в виде графика спектральной плотности ускорения. Пример такого графика показан на рисунке 3.9, б.

Степень жесткости испытания (таблица 3.2) на ШСВ определяется сочетанием диапазона частот вибрации, среднего квадратического ускорения, спектральной плотности ускорения и продолжительности испытания.

Таблица 3.2 – Параметры, характеризующие воздействие ШСВ при испытании ЭС

Степень жесткости испытания	Среднее квадратическое ускорение, $m \cdot c^2$	Спектральная плотность ускорения, $m \cdot c^{-2} \cdot 1z^{-1}$
I	109	0,05
II	200	0,2
III	200	0,2
IV	200	0,2

Примечание. Продолжительность воздействия вибрации 34 с; диапазон частот 20...2000 Гц.

Важная особенность рассматриваемого метода испытаний – использование белого шума – сигнала, при котором все резонансные частоты в заданной полосе частот возбуждаются одновременно, что позволяет учесть их взаимное влияние и приближает испытание к реальным условиям эксплуатации изделий. В этом состоит главное преимущество метода ШСВ перед методом испытания изделий на узкополосное вибрационное воздействие, и поэтому он является основным методом испытаний. Однако реализация метода ШСВ требует весьма сложного и дорогостоящего оборудования. Поэтому в ряде случаев он заменяется более простым с точки зрения технической реализации методом узкополосной случайной вибрации со сканированием в диапазоне частот, когда случайная вибрация возбуждается в узкой полосе частот, центральная частота которой по экспоненциальному закону медленно сканирует по диапазону в процессе испытания от минимального значения до максимального и наоборот. Таким

образом, обеспечивается эквивалентность методов испытаний широкополосным сигналом и синусоидальным с изменяющейся частотой. При этом должно выполняться условие

$$\text{grad } a = \sigma / \sqrt{2\pi f} = \text{const},$$

где $\text{grad } a$ – градиент ускорения, $g \cdot c^{1/2}$; σ – среднее квадратическое ускорение вибрации в узкой полосе частот, измеряемое в контрольной точке, g ; f – центральная частота полосы, Гц.

Степень жесткости испытания в этом случае определяется сочетанием диапазона частот, шириной полосы сканирования, градиента ускорения и длительности испытания. Диапазон частот выбирают из того же ряда, что и при испытании методом ШСВ (таблица 3.2). Градиент ускорения $\text{grad } a = 0,22\sqrt{G(f)}$, где $G(f)$ – спектральная плотность ускорения вибрации при испытании методом ШСВ. Длительность испытания $t_{ск} = 2t_{ш} \ln(f_в / f_н)$, где $t_{ш}$ – длительность испытания на ШСВ; $f_в$ и $f_н$ – верхняя и нижняя границы диапазона частот испытания.

Типовая структурная схема испытания на узкополосную случайную вибрацию приведена на рисунке 3.10. Случайный сигнал с выхода генератора шума 1 поступает на полосовой фильтр 2, пропускающий заданную полосу спектра. Схема АРУВ 3 обеспечивает постоянное значение градиента ускорения при частотной развертке сигнала в узкой полосе случайных вибраций.

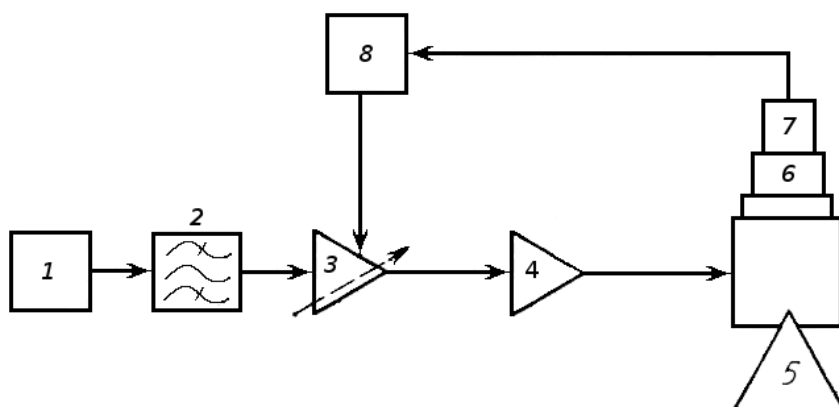


Рисунок 3.10 – Структурная схема испытания методом узкополосной случайной вибрации

1 – генератор шума; 2 – полосовой фильтр; 3 – усилитель с автоматическим регулированием уровня вибрации; 4 – усилитель мощности; 5 – вибратор; 6 – испытываемое изделие; 7 – виброизмерительный преобразователь; 8 – виброизмерительная аппаратура

Устройства для испытания. В лабораторных условиях испытание на вибрационные нагрузки проводят на вибрационном стенде (вибростенде), представляющем систему, состоящую из создающего вибрацию возбудителя механических колебаний (вибратора) и специальной платформы (стола), на котором крепятся испытываемые изделия. Вибростенд входит в состав вибрационной установки (виброустановки).

Основные требования, которым должны удовлетворять виброустановки, – это возможность получения гармонических вибраций в требуемом диапазоне ускорений и частот, устойчивость и надежность в работе при длительной эксплуатации.

Виброустановки классифицируют:

1. по способу возбуждения вибрации – механические с кинематическим и центробежным возбуждением, электродинамические, электромагнитные, гидравлические, гидромеханические, гидроэлектромагнитные, гидроэлектродинамические, пьезоэлектрические и др.;
2. по частотным диапазонам воспроизводимой вибрации – низкочастотные и высокочастотные, узкополосные и широкополосные;
3. по методу проведения испытаний – на фиксированных частотах и качающейся частоте (для гармонической вибрации), на ШСВ и сканированием полосы частот (для случайной вибрации);
4. по предельным значениям основных параметров в заданных диапазонах частот – силе возбуждения, выталкивающему усилию, перемещению, скорости, ускорению, полезной нагрузке, расходуемой мощности и т. п.;
5. по кинематическим и конструктивным признакам – для создания возвратно-поступательной или угловой вибрации; для воспроизведения вибрации в одном или нескольких направлениях (одно- или многокомпонентные); с вибрационным столом, стержнями или другими приспособлениями для крепления изделий; стационарные или переносные.

Особенности различных способов возбуждения вибрации в виброустановках в основном определяют их частотные, силовые и другие характеристики. Таблица 3.3 и 3.3, а иллюстрирует возможности существующих вибрационных установок при различных способах возбуждения вибрации. Практически в ряде конструкций гидроустановок и системах управления достигаются значения только некоторых параметров, указанных в таблице 3.3 и 3.3, а. Назначение виброустановок, подводимая к

ним мощность, конструкция вибровозбудителя, схемы управления и контроля определяют конкретные значения параметров установок, приведенные в таблице 3.3 и 3.3, а.

Виброустановки с механическим возбуждением являются низкочастотными. Они пригодны для длительных испытаний в диапазоне частот 50...80 Гц в основном крупногабаритных и тяжелых изделий массой 7... 100 кг. Повышение частоты испытания приводит к быстрому выходу из строя механизма привода и прежде всего подшипников основных узлов.

Таблица 3.3 – Возможности вибрационных испытательных установок

Способ возбуждения вибрации	Диапазон частот, Гц			
	до 10	10...10 ²	10 ² ...10 ³	10 ³ ...10 ⁴ и выше
Механический	++	++	×	–
Электродинамический	+	++	++	++
Электромагнитный	+	++	×	–
Гидравлический	+	++	×	–
Пьезоэлектрический	–	–	–	++

Таблица 3.3, а – Возможности вибрационных испытательных установок

Способ возбуждения вибрации	Амплитуда гармонической			Вид вибрации	
	до 10 ³	10 ³ ...10 ⁴	10 ³ ...10 ⁵ и выше	гармони- ческая	случайная
Механический	++	++	—	+	—
Электродинамический	++	++	+	++	++
Электромагнитный	++	+	—	+	—
Гидравлический	++	++	++	+	×
Пьезоэлектрический	+	—	—	+	—

Примечание: «++» – достижимо для распространенных конструкций виброустановок; «+» – достижимо для отдельных конструкций; «–» – недостижимо; «×2 Гц.

Наиболее простыми по конструкции являются *виброустановки с электромагнитным возбуждением*. Они применяются чаще всего для испытаний на фиксированных частотах 50 или 100 Гц. Эти установки, как и механические, имеют существенные искажения синусоидальной формы колебаний. Их достоинство – практически полное отсутствие магнитных

полей в зоне проведения испытаний.

В *виброустановках с гидравлическим возбуждением* гидросистема служит для преобразования и усиления вибрации, получаемой от задающего устройства первичного возбудителя механического, электродинамического или электромагнитного типа. Виброустановки, в которых применена гидравлическая система, позволяют создавать очень большие переменные возбуждающие усилия (до 10^6 Н). Они весьма эффективны при проведении испытаний на очень низких частотах (0,01..1 Гц). При этом в некоторых конструкциях максимальная амплитуда вибрации может достигать 200 мм. Гидравлические виброустановки пригодны главным образом для испытаний изделий сверхбольших габаритов и массы в относительно узком диапазоне низких частот.

Пьезоэлектрические виброустановки ввиду чрезвычайно малой грузоподъемности (до 0,5...1 Н), возможности работы в области высоких частот (свыше 1000 Гц) и малых амплитуд возбуждаемых вибраций используют только в калибровочной аппаратуре и в системах для исследования резонансных частот конструктивных элементов ЭС.

Практика исследования и испытаний показала, что наиболее совершенными являются *установки с электродинамическим вибровозбудителем*. Их отличают широкий диапазон воспроизводимых частот, хорошая направленность вибрации (малые поперечные составляющие вибрации), незначительный коэффициент нелинейных искажений, сравнительно слабые магнитные поля в зоне испытаний и др. Применение специальной аппаратуры управления на электродинамических виброустановках позволяет реализовать все основные режимы вибрационных испытаний. Структурная схема электродинамической установки приведена на рисунке 3.11.

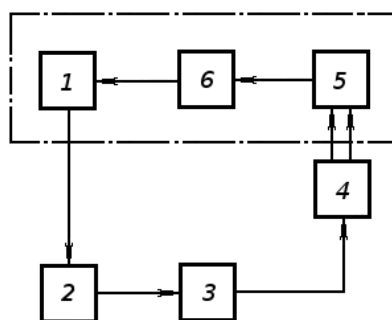


Рисунок 3.11. Структурная схема электродинамической вибронной установки:

1 – прибор управления вибронной установкой; 2 – усилитель мощности; 3 – согласующее устройство; 4 – вибростейд; 5 – виброизмерительный преобразователь; 6 – измерительная аппаратура

Важная составная часть установки – аппаратура управления (выделена штрихпунктиром на рисунке 3.11), которая служит для выработки сигнала звуковой частоты и для измерения амплитуд ускорения и перемещения стола вибростенда. Аппаратура управления включает устройство 1 автоматического поддержания заданного ускорения и автоматического качания частоты в заданном диапазоне с заданной скоростью. Обычно это задающий генератор и автоматический регулятор амплитуды. После усилителя мощности 2 сигнал переменного тока поступает в подвижную катушку вибростенда 4, реактивная составляющая мощности которой изменяется в широких пределах вследствие изменения частоты тока возбуждения. Поэтому для согласования выходного сопротивления усилителя мощности с входным сопротивлением подвижной катушки используют согласующее устройство 3 – набор последовательно включенных емкостей. Виброизмерительный преобразователь 5 крепят либо на столе вибростенда, либо на испытываемом изделии. Он служит для выработки пропорциональных амплитудам ускорений электрических сигналов, которые поступают на измерительное устройство 6 аппаратуры управления и на схему поддержания заданной амплитуды ускорения или перемещения.

Типовая конструкция *электродинамического вибростенда (ЭДВ)* приведена на рисунке 3.12. Катушка подмагничивания 8, по которой протекает постоянный ток, создает в магнитопроводе 6 постоянный магнитный поток 7, пересекающий воздушный зазор магнитопровода. Если в этот воздушный зазор поместить проводник – катушку 5, через которую пропустить постоянный ток, то возникающий вокруг нее магнитный поток взаимодействует с магнитным потоком 7. Если магнитный поток катушки направлен так, что его силовые линии складываются с силовыми линиями магнитного потока 7 над катушкой и вычитаются под ней, то в результате такого взаимодействия на катушку действует выталкивающая сила по правилу левой руки.

Если через цилиндрическую подвижную катушку 5 пропустить переменный ток, то катушка начнет совершать колебательное движение вверх-вниз с частотой и амплитудой, соответствующими частоте и амплитуде подводимого электрического сигнала. В рассматриваемом случае катушка, жестко соединенная с рабочим столом 2, образует подвижную систему вибростенда, которая подвешена на упругих элементах 3 – подвесках. Чаще применяют механические подвески в виде пружин или дисковых диафрагм, в отдельных образцах ЭДВ – пневматические или электромагнитные. Подвески позволяют системе двигаться в строго вертикальном направлении.

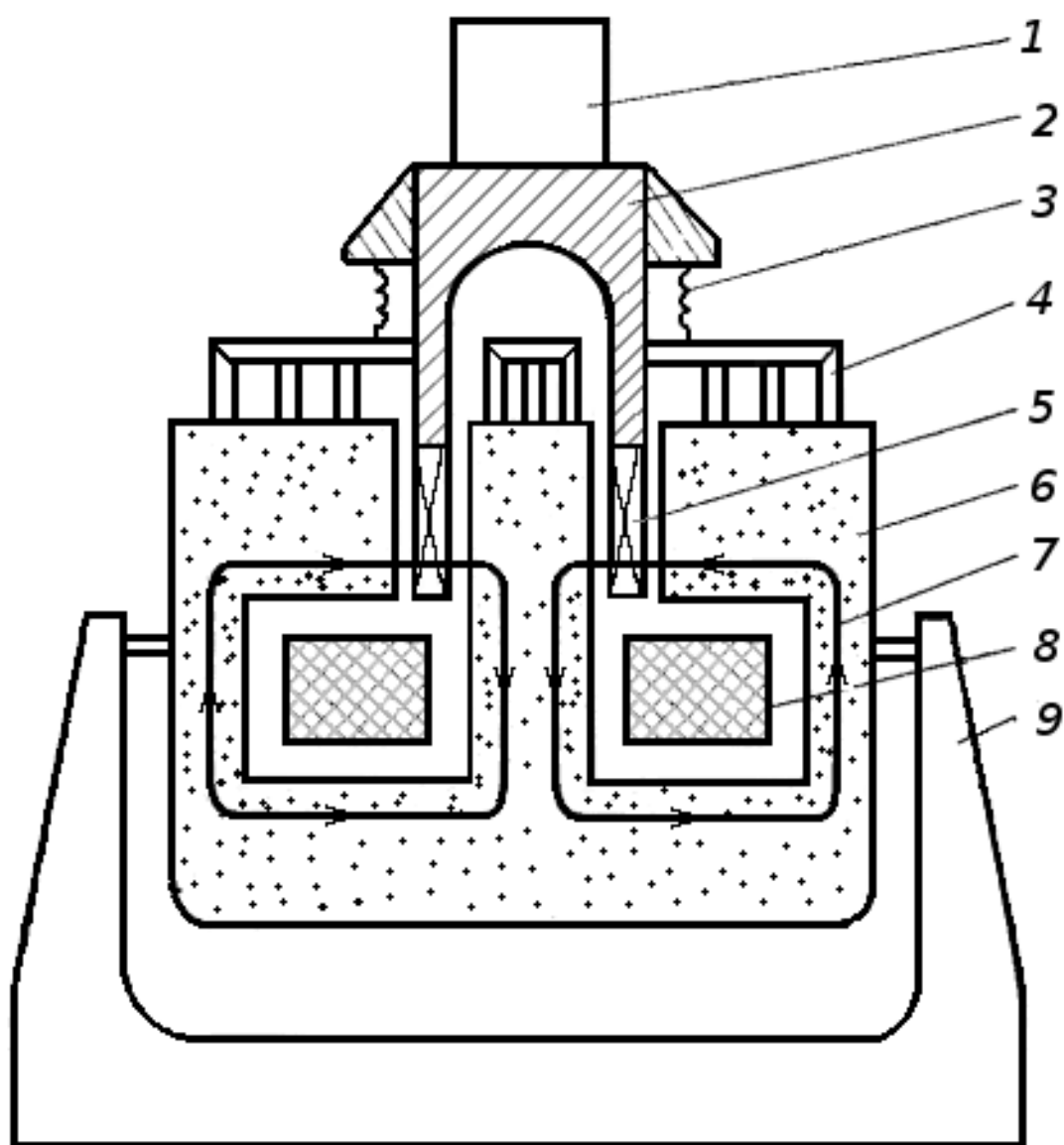


Рисунок 3.12 – Типовая конструкция электродинамического вибростенда:

1 – испытываемое изделие; 2 – стол вибростенда; 3 – упругая подвеска стола; 4 – магнитный экран; 5 – подвижная катушка; 6 – магнитопровод; 7 – магнитный поток; 8 – катушка подмагничивания; 9 – основание

По конструкции магнитной системы различают ЭДВ с одностержневым и двухстержневым вибратором (рисунок 3.13). В случае одностержневого вибратора рабочий стол и подвижная катушка расположены в противоположных частях магнитной цепи (рисунок 3.13, а); в случае двухстержневого вибратора рабочий стол соединен непосредственно с подвижной катушкой (рисунок 3.13, б). Достоинствами одностержневого вибратора являются простота конструкции, малые потери, удобство крепления и центровки подвижной системы. К недостаткам можно отнести

значительные поля рассеяния магнитного потока в плоскости рабочего стола (что требует использования специальных магнитных экранов защиты испытываемых изделий), пониженную жесткость конструкции подвижной системы из-за большой ее длины.

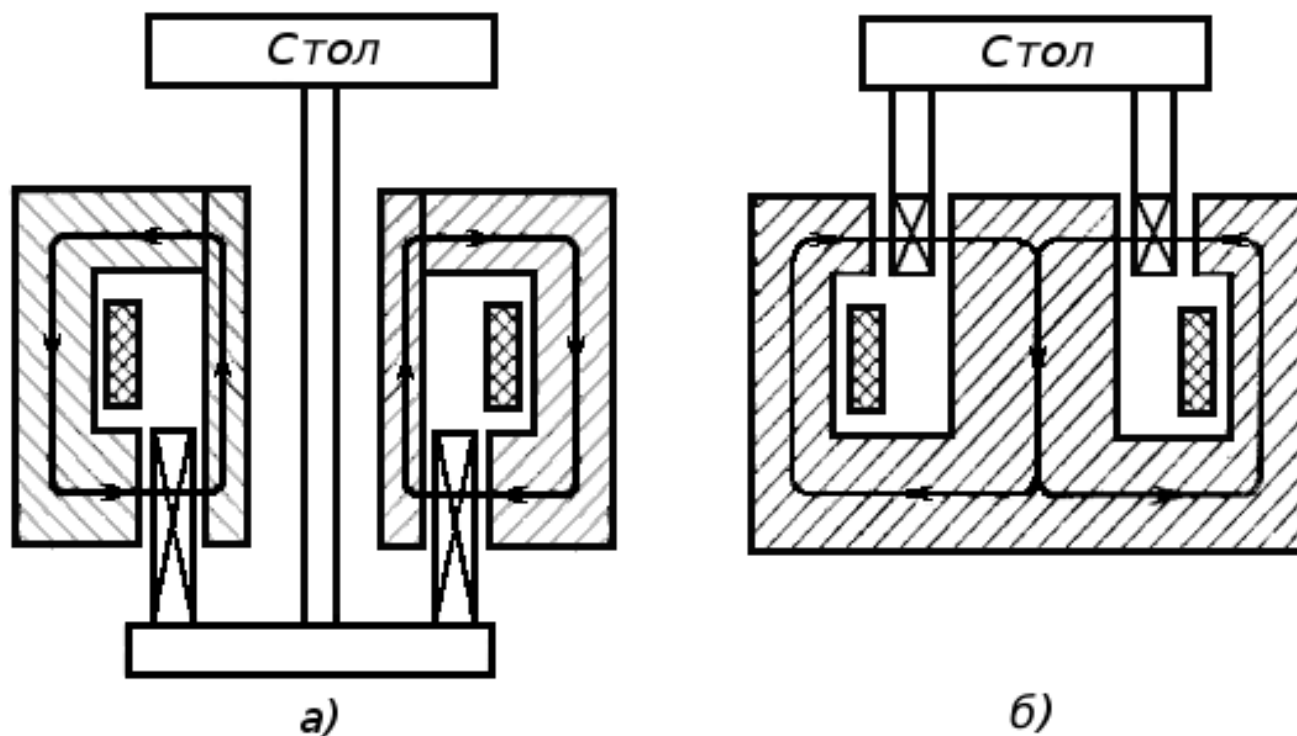


Рисунок 3.13 – Конструкции одностержневого (а) и двухстержневого (б) вибраторов

Более совершенна магнитная система двухстержневого вибратора, обмотки которой выполнены так, что их магнитодвижущие силы равны и направлены навстречу друг другу. Магнитные потоки обеих обмоток в воздушном зазоре складываются и оказывают совместное действие на подвижную обмотку. Потери мощности в двухстержневом вибраторе почти вдвое меньше, чем в одностержневом. Конструкция двухстержневого вибратора позволяет получать большие возмущающие силы и создавать колебания с высокими ускорениями.

При использовании данной конструкции необходимо применять магнитный экран (рисунок 3.12), обеспечивающий защиту испытываемого изделия от влияния магнитного поля ЭДВ, рассеиваемого из воздушного зазора. Эффективным способом ослабления магнитного поля рассеивания, которое не должно превышать 5 Э на расстоянии 20 мм от поверхности стола, является применение компенсирующей размагничивающей катушки, расположенной выше воздушного зазора и включенной таким образом, что ее постоянное магнитное поле направлено навстречу магнитному полю

рассеивания. Для лучшего сглаживания результирующего поля и дополнительной компенсации магнитного поля компенсирующую катушку и магнитный экран (одинарный или двойной) используют совместно; магнитное поле рассеяния ослабляется более чем в 60 раз.

Важное значение при работе ЭДВ имеет охлаждение подвижной катушки, через которую проходит переменный ток от единиц до сотен ампер. При этом обмотка сильно разогревается и может выйти из строя. Для отвода тепла применяют различные способы охлаждения.

Электродинамические вибростенды малой мощности принудительного охлаждения не имеют: ЭДВ средней мощности охлаждают, как правило, сжатым воздухом, подведенным из воздушной магистрали, или воздухом от специальной воздуходувки. Подвижные катушки мощных ЭДВ охлаждают чаще всего дистиллированной водой или трансформаторным маслом. Иногда в ЭДВ средней и большой мощности применяют комбинированную систему охлаждения, в которой подвижная катушка охлаждается потоком воздуха, а катушка подмагничивания и кольцевой зазор магнитопровода – проточным маслом. Использование масляного охлаждения очень часто позволяет значительно уменьшить нелинейные искажения воспроизводимых вибраций, особенно при испытаниях ЭС, чувствительных к этому параметру ЭДВ.

Стол-платформа при всей своей кажущейся простоте – один из важнейших конструктивных элементов ЭДВ, существенно влияющий на его характеристики. Верхнюю часть стола выполняют в виде плоского диска с впрессованными втулками, через которые к столу крепят приспособления с испытываемым изделием. Стол ЭДВ должен быть прочным, жестким и в то же время по возможности легким, так как его масса влияет на основную характеристику ЭДВ – максимально развиваемое ускорение.

Электродинамический вибростенд располагают на специальном фундаменте, значительно снижающем вибрации здания. Помещение, в котором находится ЭДВ, должно обладать хорошей звукоизоляцией, позволяющей уменьшить шум до безопасного для обслуживающего персонала уровня.

Основные технические характеристики ЭДВ, рекомендуемые для широкого класса ЭС, приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Основные технические характеристики электродинамических вибростендов

Тип вибростенда	Выталкивающая сила, Н	Максимальная нагрузка (грузоподъемность), кг	Максимальное перемещение, мμ	Масса подвижной системы.	Частота первого высокочастотного резонанса, Гц	Коэффициент гармоник, %	Ток подмагничивания, А
ВЭДС-10	100	1,9	6	6	4000	3	0,5
ВЭДС-100Б	1000	22	7,5	2,4	3400	8	1,6
ВЭДС-200А	2000	45	12,5	5	–	8	2,0
ВЭДС-400А	4000	90	12,5	9,2	–	8	3,5
ВЭДС-800А	8000	150	12,5	16	–	8	4,4
ВЭДС-1500	15 000	300	6	30	1850	10	6,7

Примечание: Диапазон рабочих частот 5...5000 Гц; максимальное ускорение без нагрузки 1000 м/с².

Трудной технической задачей является создание и эксплуатация виброустановок, предназначенных для испытания ЭС методом широкополосной случайной вибрации. Так как среднее квадратическое ускорение создается на столе вибростенда, то из-за нелинейности АЧХ системы вибростенд – приспособление – изделие спектральная плотность ускорения в процессе испытания может искажаться. Поэтому для обеспечения воспроизводимости необходимо так сформировать входной сигнал, чтобы на испытываемых изделиях получить постоянную спектральную плотность ускорения в диапазоне частот испытания. С этой целью входной сигнал с помощью фильтров разделяется на ряд узких частотных полос. Регулировка уровня вибрации в каждой полосе частот происходит отдельно. На вибрационных установках, не имеющих устройств автоматического выравнивания спектральной плотности ускорения, для получения ее постоянного уровня во всем диапазоне частот испытания снимают АЧХ системы вибростенд – приспособление – изделие при постоянном напряжении на выходе усилителя мощности. Изменяя уровни вибрации на выходе в каждой полосе частот, выравнивают АЧХ вибрационного стенда таким образом, чтобы на испытываемых изделиях в контрольной точке получить постоянную спектральную плотность ускорения в диапазоне частот испытания.

Изделия на столе вибростенда крепят с помощью

специальных *приспособлений*. При этом должны выполняться следующие требования: изделие должно крепиться в приспособлении с минимальными зазорами и тем же способом, что при эксплуатации; резонансная частота $f_{\text{оп}}$ приспособления должна быть в 1,5...2 раза выше верхнего значения частоты вибрации изделия; центр тяжести изделия должен быть на оси виброштока. Наиболее просто крепление изделия к платформе вибростенда осуществляется с помощью пазовых болтов. В составе виброустановки приспособление служит источником наибольших погрешностей испытательного режима. С целью их уменьшения необходимо повышать жесткость приспособления при одновременном уменьшении его массы и поперечных колебаний при консольном нагружении испытываемыми изделиями. Для этого приспособления изготавливают из материала с максимальной удельной жесткостью и минимальной удельной массой, выбирая рациональную форму приспособления и вводя в его конструкцию дополнительные элементы жесткости.

Для изготовления приспособлений широко используют сплавы алюминия: АЛ-9, АЛ23-1. Более перспективным материалом является магниевый сплав МЛ5. Благодаря его существенно меньшей плотности (в 1,5 раза по сравнению с алюминиевыми сплавами) можно уменьшить массу приспособлений. С этой целью допускается также высверливать в приспособлении несквозные отверстия диаметром до $1/3$ толщины его стенки. Однако, как показывает опыт, снижение массы таким путем приводит к значительному ухудшению технических характеристик приспособлений.

Для одновременного испытания нескольких образцов миниатюрных ЭС целесообразно использовать приспособления в форме многогранников (треугольников, кубов, пятигранников и др). Наиболее предпочтительны приспособления в форме куба, позволяющие крепить испытываемые изделия сразу в трех плоскостях. Длину l ребра куба определяют исходя из размеров и числа испытываемых изделий, размещаемых на одной грани. Резонансная частота куба связана с длиной его ребра соотношением $f_0 = 8 \cdot 10^8 / l$.

При конструировании приспособлений с учетом возможности одновременного испытания нескольких образцов миниатюрных ЭС особое внимание следует обращать на центровку системы стол вибратора – приспособление – испытываемое изделие, т.е. на совмещение центра тяжести приспособления с испытываемым изделием и продольной оси подвижной части вибратора. Особенно важно соблюдать центровку при испытаниях на частотах от 1000 до 5000 Гц, так как на этих частотах даже незначительная расцентровка приводит к существенным поперечным перегрузкам приспособлений, превышающим в некоторых случаях в 2...3 раза вибрацию в

основном направлении Наряду с центровкой указанной системы в многопозиционном приспособлении следует строго соблюдать его симметричное нагружение испытываемыми изделиями. При этом на приспособлении предусматривается место для установки датчика в контрольной точке – единственной, в которой получают контрольный сигнал, соответствующий требованиям испытания, а также информацию о движении испытываемого изделия. Контрольную точку выбирают по возможности ближе к точке крепления приспособления на платформе вибратора. Для уменьшения числа местных резонансов соединения испытываемых изделий нужно крепить изделие к платформе с наибольшей жесткостью при небольшом числе крепежных деталей.

После изготовления приспособление должно быть аттестовано на правильность передачи воздействия. С этой целью снимают частотную характеристику приспособления, для чего приспособление закрепляют предусмотренным способом на платформе вибростенда. На основании показаний датчика, установленного в контрольной точке, поддерживают постоянное ускорение, а с помощью датчика, установленного в точке приспособления, наиболее удаленной от контрольной, производят измерение ускорения. Если в рабочем диапазоне частот ускорения в данной и контрольной точках не отличаются более чем на $\pm 25\%$, то приспособление можно считать пригодным для одновременного испытания нескольких изделий.

Для измерения параметров вибрации применяют специальную виброизмерительную аппаратуру. Основные технические характеристики некоторых типов такой аппаратуры, выпускаемой серийно отечественной промышленностью, приведены в таблице 3.5. Так как наиболее важными параметрами гармонической вибрации являются амплитуда ускорения/перемещения и виброскорость/частота, а случайной вибрации – спектральная плотность ускорения, то в зависимости от измеряемого параметра вибрации шкалы приборов виброизмерительной аппаратуры отградуированы в единицах перемещения, скорости и ускорения.

Таблица 3.5 – Основные типы характеристики некоторых типов виброизмерительной аппаратуры

Тип виброизме- рительной аппаратуры	Диапазон частот, Гц	Диапазон измерения			Тип виброизмери- тельного преобразовате- ля	*погрешность измерений	Масса, кг
		перемещения, мм	скорости, м/с	ускорения, м/с ²			
ВА-2	5...10000	1...25	10^{-3} ...16	10^{-2} ... 10^5	Д14	±12%	25
	5...2000	0.3...100	$3 \cdot 10^4$...5	$0.3 \cdot 10^{-2}$...2	Д13	± 1,5 дБ	25
ПИУ-1М	40...3000	–	–	0...5000	ПДУ-1	±15 дБ	5,5
				0...500			
УП-3М	20...5000	–	–	0...1000	ИС-318	±5% (6Э...5000 Гц)	6
СУВУ-3	5...10000	25	–	2500	ИС-313	±5% (20... 10 000 Гц)	45

Примечание: Погрешность измерений приведена без учета погрешностей источников вторичного электропитания

При отсутствии измерительных приборов амплитуду вибрации можно определить приближенно. Для этого на столе вибростенда перпендикулярно его рабочей оси закрепляют карандаш, под которым располагают полосу белой бумаги. При протягивании бумаги карандаш оставляет след, повторяющий движение стола вибростенда, – кривую колебания. Измеряя расстояние между двумя соседними максимумами и минимумами полученной кривой и деля это расстояние пополам, получают приближенное значение амплитуды вибрации.

3.5. Воздействие ударной нагрузки

Механизм воздействия удара. В механике абсолютно твердого тела удар рассматривается как некоторый скачкообразный процесс, продолжительность которого бесконечно мала. Во время удара в точке соприкосновения соударяющихся тел возникают большие, но мгновенно действующие силы, приводящие к конечному изменению количества движения. В реальных системах всегда действуют конечные силы в течение конечного интервала времени, и соударение двух движущихся тел связано с их деформацией вблизи точки соприкосновения и распространением волны сжатия внутри этих тел. Продолжительность удара зависит от многих физических факторов: упругих характеристик материалов соударяющихся тел, их формы и размеров, относительной скорости сближения и т. д.

Изменение ускорения во времени принято называть импульсом ударного ускорения или ударным импульсом, а (перегрузку), длительность действия ударного ускорения и форму ударного импульса. Результат воздействия удара на изделие (реакция изделия) зависит от его динамических свойств – массы, жесткости и частоты собственных колебаний. Под реакцией ЭС на воздействие ударного импульса понимают отклик изделия на это воздействие. Различают несколько основных видов реакции ЭС, соответствующих баллистическому (или квазиамортизационному), квазирезонансному и статическому (или квазистатическому) режимам возбуждения.

Рассмотрим реакцию на удар линейной механической системы с одной степенью свободы, у которой отсутствует демпфирование (рисунок 3.14). Пример импульса возбуждения при ударе приведен на рисунке 3.15. Искажение формы ударного импульса длительностью τ происходит вследствие наложения колебаний, возникающих в механической системе стол – приспособление – изделие. Уравнение движения изделия при отсутствии потерь на трение

$$m\ddot{x} + Cx = CF_{осн}$$

где m и $\ddot{x}$ – масса и ускорение изделия; C – жесткость пружины; x – смещение изделия при ударе; $F_{осн}$ – ударная сила импульса, приводящая в движение опорное основание (стол стенда, шасси или плату), получающее первичный удар.

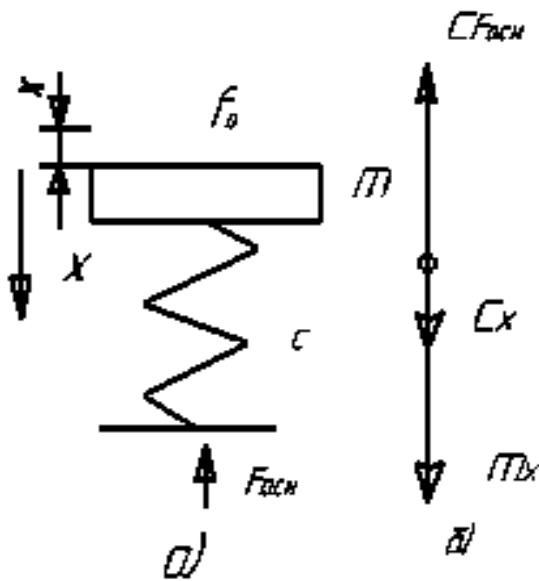


Рисунок 3.14 – Механическая система с одной степенью свободы (а) и схема приложения сил (б)

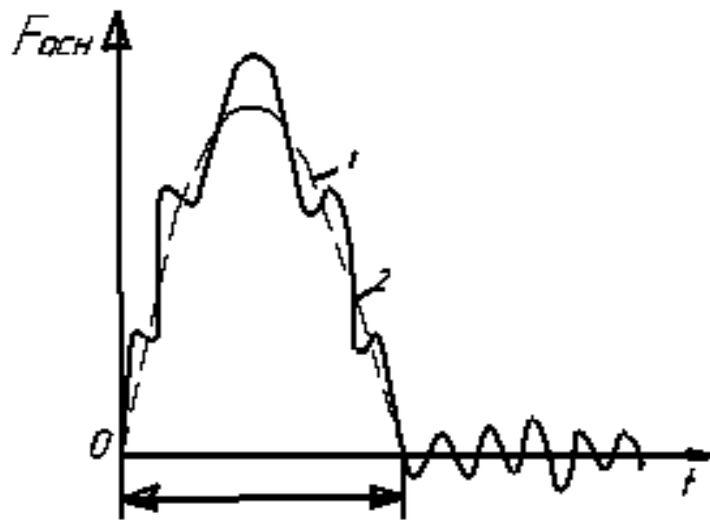


Рисунок 3.15 – Пример импульса возбуждения при ударе:

1 – воздействующий полусинусоидальный ударный импульс; 2 – искажение формы ударного импульса

Характеристики ускорения $\ddot{x} = d^2x/dt^2$ для изделий с различными периодами T_{01} собственных колебаний приведены на рисунке 3.16. При $T_{01} \gg \tau$ – баллистический режим возбуждения максимальное значение a_{m12} ускорения изделия всегда меньше максимального (пикового) значения a_n , ускорения воздействующего ударного импульса: $a_{m12} < a_n$ (рисунок 3.16, а). При $T_{01} \cong \tau$ – квазирезонансный режим возбуждения – $a_{m21} > a_n$ (рис. 3.16, б).

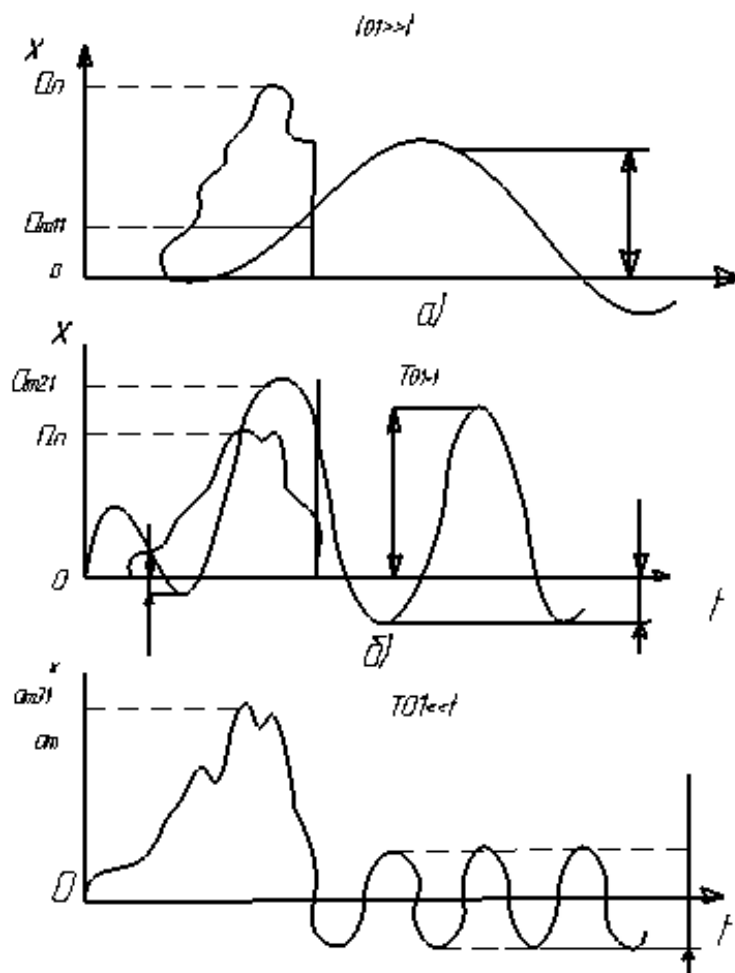


Рисунок 3.16 – Кривые возбуждения изделий при ударе: a_{m11} , a_{m21} , a_{m31} – максимальные положительные ускорения во время удара; a_{m12} , a_{m22} , a_{m32} – то же после удара; a_{m23} – максимальное отрицательное ускорение во время удара; a_{m14} , a_{m24} , a_{m34} – то же после удара

При $T_{01} \ll \tau$ наблюдается статический режим возбуждения – изделие повторяет воздействующий ударный импульс, поэтому $a_{m31} = a_n$ (рисунок 3.16, в). В этом случае после действия импульса имеют место остаточные колебания собственной частотой f_0 изделия.

Отклик изделия на воздействие ударного импульса (рисунок 3.16) можно условно разбить на два участка: отклик изделия в течение действия ударного импульса (текущий отклик) и после его окончания (отклик последействия). Для удобства анализа воздействия на изделие ударной нагрузки строят огибающие текущего отклика и отклика последействия. При этом учитывают, что результаты испытания оценивают на практике по максимальному значению ускорения отклика. В то же время, как видно из рисунка 3.16, отрицательные значения ускорения изделия во время действия

ударного импульса меньше положительных, а отрицательные значения ускорения изделия после действия ударного импульса либо меньше положительных, либо равны им. Поэтому при построении огибающих отклика отрицательные значения ускорения не учитывают, а из положительных значений учитывают только максимальные значения ускорения текущего отклика и отклика последействия. По оси ординат откладывают коэффициент динамичности μ , равный отношению максимального значения a_m ускорения изделия к максимальному значению a_0 ускорения ударного импульса (рисунок 3.17). При этом в случае огибающей текущего отклика (кривая Ω) под a_m понимают максимальное ускорение изделия в течение действия ударного импульса, а в случае огибающей отклика последействия (кривая M) – максимальное ускорение отклика последействия. По оси абсцисс откладывают обобщенную частоту – безразмерную величину $f_0\tau$. Поэтому графики зависимостей μ от $f_0\tau$ в существующей нормативно-технической документации называют ударными спектрами.

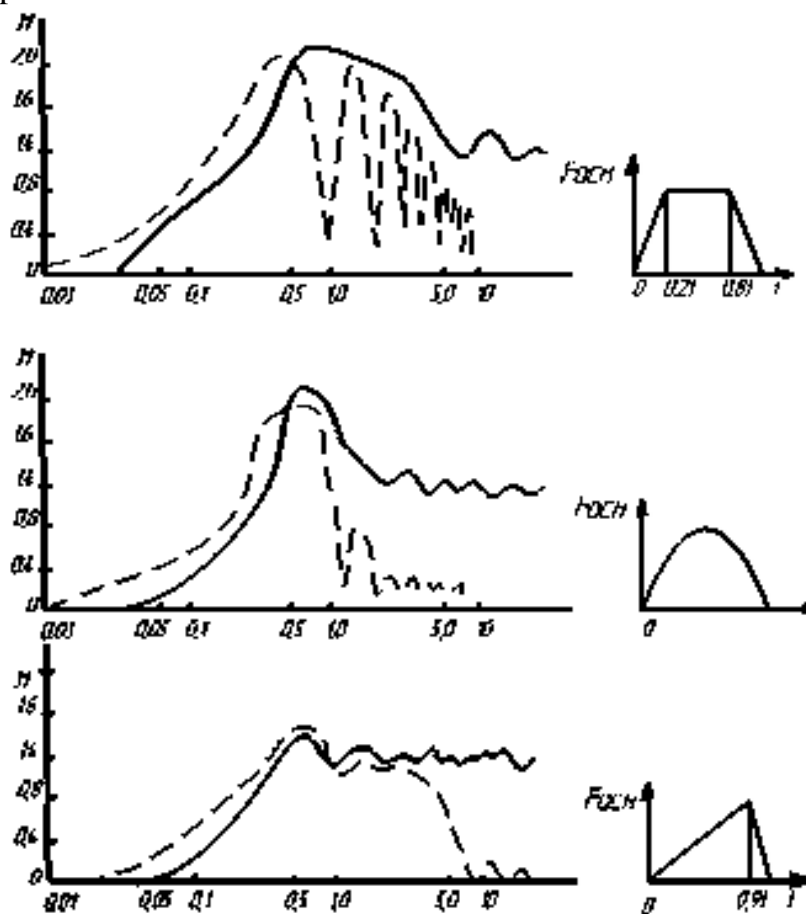


Рисунок 3.17 – Огибающие откликов ЭС при воздействии симметричных трапецеидального (а) и полусинусоидального (б) импульсов, пилообразного импульса (в)

Поскольку отрицательное ускорение во время удара всегда меньше положительного, изделия с неизвестными направлениями воздействий рекомендуется испытывать в положительном и отрицательном направлениях. С учетом того, что изделие может быть испытано в трех взаимно перпендикулярных направлениях, общее число направлений воздействия при испытании на удар должно быть равно шести.

На спектрах (рисунок 3.17) в соответствии с рисунком 3.16 можно выделить баллистическую, квазирезонансную и статическую области. Баллистической области соответствует участок обобщенных частот, при которых коэффициент динамичности $\mu < 1$ (для полусинусоидального импульса $f_0\tau < 0.25$). В этой области результаты испытания существенно зависят от длительности и формы импульса. Поэтому для обеспечения воспроизводимости результатов следует избегать испытания в данной области спектра или более строго выдерживать параметры удара.

Квазирезонансной области соответствует часть спектра от верхней границы баллистической области до обобщенной частоты, при которой $\mu \cong 1$. Верхняя граница этой области не определена. Например, для полусинусоидального импульса Международная электротехническая комиссия рекомендует за верхнюю границу принимать $f_0\tau = 10$. В практике испытаний достаточно принимать $f_0\tau = 5$ что соответствует $\mu = 1.2$. Допускается принимать $f_0\tau = 2$ ($\mu = 1.3$). Квазирезонансная область отражает самый тяжелый режим испытания, при котором наблюдаются наибольшие коэффициенты динамичности при ударе. Поскольку в этом случае вероятность разрушения ЭС максимальная, при проведении такого испытания наиболее достоверно определяют запас прочности испытываемого изделия.

В статической области, соответствующей остальной части спектра, $\mu \cong 1$ и результаты испытания не зависят ни от формы импульса, ни от его длительности. Испытание на воздействие ударных нагрузок в статической области равноценно испытанию на воздействие линейного ускорения, так как последнее можно рассматривать как удар бесконечной длительности.

Характеристики режимов испытания. Различают два вида испытания изделий на ударную нагрузку: на ударную прочность и ударную устойчивость. Испытание на ударную прочность проводят с целью проверки способности ЭС противостоять разрушающему действию механических ударов, сохраняя свои параметры после воздействия ударов в пределах,

указанных в НТД на изделие. Испытание на ударную устойчивость проводят с целью проверки способности ЭС выполнять свои функции в условиях действия механических ударов.

При испытании на ударную нагрузку, испытываемые ЭС подвергают воздействию либо одиночных, либо многократных ударов. В последнем случае частота следования ударов должна быть такой, чтобы можно было выполнить контроль проверяемых параметров ЭС. Основные характеристики режимов испытания ЭС при многократном воздействии ударов – пиковое ударное ускорение и общее число ударов – задаются в соответствии со степенью жесткости испытаний (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Основные характеристики режимов испытания

Степень жесткости	Пиковое ударное ускорение, g	Общее число ударов для предусмотренной в стандартах и ТУ на изделия выборки объемом	
		3 и менее	Более 3
I	15	12000	10000
II	40	12000	10000
III	75	6000	4000
IV	150	6000	4000

Форма ударного импульса как одна из важнейших характеристик, обеспечивающих единство испытаний, должна регламентироваться в ЧТУ. Самым опасным для изделия является трапецеидальный импульс, поскольку он имеет наиболее широкую область квазирезонансного возбуждения и наибольший коэффициент динамичности в этой области. Однако импульс трапецеидальной формы трудно воспроизводится на лабораторном оборудовании. Пилообразный импульс позволяет достигнуть наилучшей воспроизводимости испытаний, так как в силу несимметричности его остаточный спектр является непериодическим. Но получить пилообразный импульс труднее, чем импульсы другой формы. На практике при испытании чаще всего используют полу-синусоидальный ударный импульс, формирование которого наиболее просто и требует наименьших затрат энергии.

Испытание на ударную нагрузку проводят в квазирезонансном режиме возбуждения. Длительность действия ударного ускорения τ выбирают в зависимости от значения низшей резонансной частоты f_{0H} изделия:

f_{0H} , Гц	60 и менее	60...100	100...200	200...500	500... 1000	Свыше 1000
τ , мс	18±5	11±4	6±2	3±1	2±0,5	1±0,3

Если изделия имеют амортизаторы, то при выборе длительности действия ударного ускорения учитывают низшие резонансные частоты самих изделий, а не элементов защиты. В качестве проверяемых выбирают параметры, по изменению которых можно судить об ударной устойчивости ЭС в целом (искажение выходного сигнала, стабильность характеристик функционирования и т. д.).

При разработке программы испытаний направления воздействий ударов устанавливают в зависимости от конкретных свойств испытываемых ЭС. Если свойства ЭС неизвестны, то испытание следует проводить в трех взаимно перпендикулярных направлениях. При этом рекомендуется выбирать (из диапазона, оговоренного в ЧТУ) длительность ударов, вызывающих резонансное возбуждение испытываемых ЭС.

Ударную прочность оценивают по целостности конструкции (например, отсутствию трещин, наличию контакта). Изделия считают выдержавшими испытание на ударную прочность, если после испытания они удовлетворяют требованиям стандартов и ПИ для данного вида испытания.

Испытание на ударную устойчивость рекомендуется проводить после испытания на ударную прочность. Часто их совмещают. В отличие от испытания на ударную прочность испытание на ударную устойчивость осуществляют под электрической нагрузкой, характер и параметры которой устанавливают в ЧТУ и ПИ. При этом контроль параметров ЭС производят в процессе удара для проверки работоспособности изделий и выявления ложных срабатываний. Изделия считают выдержавшими испытание, если в процессе и после него они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах и ПИ для данного вида испытания.

Устройства для испытания. Ударные стенды классифицируют по следующим признакам:

- по характеру воспроизводимых ударов – стенды одиночных и многократных ударов;
- по способу получения ударных перегрузок – стенды свободного падения и принудительного разгона платформы с испытываемым изделием;

- по конструкции тормозных устройств – с жесткой наковальней, с пружинящей наковальней, с амортизирующими резиновыми и фетровыми прокладками, со сминающимися деформируемыми тормозными устройствами, с гидравлическими тормозными устройствами и т. д.

В зависимости от конструкции ударного стенда и в особенности от применяемого в нем тормозного устройства получают ударные импульсы полусинусоидальной, треугольной и трапецеидальной формы.

Для испытания ЭС на одиночные удары служат ударные стенды копрового типа, а на многократные – стенды кулачкового типа, воспроизводящие удары полу-синусоидальной формы. В этих стендах используется принцип свободного падения платформы с испытуемым изделием на амортизирующие прокладки.

Основными элементами ударного стенда копрового типа (рисунок 3.18) являются стол 3, основание 7, служащее для гашения скорости стола в момент удара, направляющая 4, обеспечивающая горизонтальное положение стола в момент удара; прокладки 5, формирующие ударный импульс.

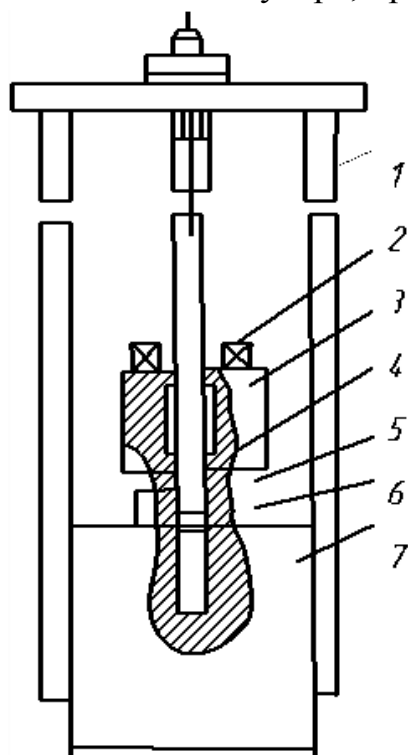


Рисунок 3.18 – Схема установки для испытания ЭС на воздействие одиночных ударов
1 – стойка; 2 – изделие; 3 – стол;
4 – направляющая 5 – амортизирующие прокладки, 6 – накладка, 7 – основание

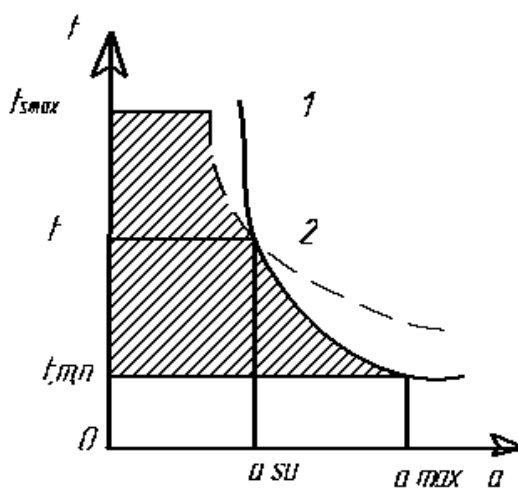


Рисунок 3.19 – Эксплуатационные зависимости длительности фронта ударного импульса от ударного ускорения при ограничении по скорости соударения (1) и по пути торможения (2)

Энергия, необходимая для создания удара, накапливается в результате подъема стола, с закрепленным на нем испытываемым изделием, на заданную высоту. Для подъема стола и последующего его сбрасывания стенд снабжается приводом и механизмом сброса. Кинетическая энергия, приобретенная телом в процессе предварительного разгона, гасится в результате соударения с неподвижной преградой. Длительность ударного воздействия складывается из длительности торможения ударяющего тела (активный этап удара) и длительности восстановления упругих деформаций соударяющихся тел (пассивный этап удара). Ускорение определяется скоростью удара и зависит от высоты падения. В конце торможения ударяющего тела скорость соударения падает до нуля, а ударное ускорение и перемещение тел относительно друг друга достигают максимальных значений. Условия воспроизведения закона изменения ударного ускорения во времени определяются начальной скоростью соударения тел, максимальным перемещением при соударении и максимальным ударным ускорением. Стенды копрового типа с жесткой наковальней используют для получения ударных импульсов с большим ударным ускорением и очень малой длительностью (единицы микросекунд).

Ограничивающими условиями при воспроизведении ударной нагрузки являются соблюдение требуемой скорости и заданного пути торможения, соответствующих максимальной деформации тормозного устройства. Предельные эксплуатационные характеристики ударного стенда можно получить используя зависимости

$$t_v = v_{np} / (Aa), \quad (3.8)$$

$$t_s = \sqrt{S_{np} / (Ba)}, \quad (3.9)$$

где t_v и t_s – длительности фронта воспроизводимого ударного импульса с учетом ограничения по предельным скорости и пути торможения ударяющего тела; v_{np} и S_{np} – предельная скорость и предельно допустимый тормозной путь ударяющего тела; A и B – коэффициенты, значения которых зависят от формы фронта ударного импульса; a – ударное ускорение.

Тогда ударное ускорение a_{sv} и длительность t_{sv} фронта воспроизводимого ударного импульса, удовлетворяющие одновременно ограничениям по скорости и пути торможения ударяющего тела,

$$a_{sV} = \frac{B v_{PP}^2}{A S_{PP}}, \quad t_{sV} = \frac{A S_{PP}}{B v_{PP}}.$$

На рисунке 3.19 приведены эксплуатационные характеристики $t_V = f(a)$ и $t_S = f(a)$ ударного стенда. Заштрихованная область показывает, какие длительности фронта ударного импульса и ударные ускорения можно воспроизводить на ударном стенде. Значения $a_{\max}$, $t_{V\min}$, $t_{S\max}$ соответствуют предельным эксплуатационным характеристикам стенда и определяются по формулам (3.8), (3.9).

На рисунке 3.20 показано устройство механического стенда кулачкового типа. Стол 1 представляет собой стальную плиту с пазом для крепления изделия, на нижней стороне которой имеются направляющие 4, перемещающиеся во втулках, укрепленных в кронштейнах станины. На специальных упорах чугунной станины расположены амортизирующие прокладки 5 для регулирования ударного ускорения, а в нижней части станины имеются резиновые амортизаторы 8, поглощающие часть энергии удара. Приводной механизм, состоящий из клиноременной передачи 2 и электродвигателя 7, установлен на площадке внутри станины. Натяжение ремня регулируют, изменяя набор шайб, размещенных под электродвигателем. Подъем стола осуществляется с помощью кулачка 3, вращающегося от приводного механизма.

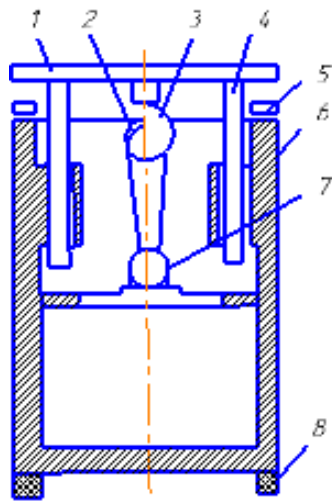


Рисунок 3.20 – Схема стенда для испытаний ЭС на воздействие многократных ударов:

1– стол; 2 – клиноременная передача; 3 – кулачок; 4 – направляющие; 5 – амортизирующая прокладка; 6 – станина; 7 – электродвигатель; 8 – резиновые амортизаторы

При испытании на воздействие многократных нагрузок ударные стенды должны обеспечивать получение заданного ускорения с погрешностью не более $\pm 20 \%$. Ударная перегрузка, длительность и форма ударного импульса, как в стендах копрового типа, так и в стендах кулачкового типа регулируются в широких пределах, как правило, с помощью амортизирующих войлочных, фетровых, резиновых, пластмассовых или комбинированных прокладок. Для формирования полусинусоидального импульса длительностью 0,5...5 мс. Применяют резину средней и повышенной твердости или фетр; для формирования импульса большей длительности – резины малой твердости или губчатые; для импульсов длительностью менее 0,5 мс может оказаться целесообразным использование винипласта, фторопласта и других листовых материалов. В некоторых случаях применяют многослойные прокладки. При этом между резиновыми могут устанавливаться металлические прокладки из листового алюминия или стали толщиной 1...2мм. Удары длительностью 1 мм и менее рекомендуется получать соударением стальных закаленных поверхностей – плоской и сферической. В этом случае стол выполняется в виде бойка.

Помимо рассмотренных механических ударных стендов применяют электродинамические и пневматические ударные стенды. В электродинамических стендах через катушку возбуждения подвижной системы пропускают импульс тока, амплитуда и длительность которого определяют параметры ударного импульса. Так как принцип действия этих стендов основан на взаимодействии электромагнитных полей, то их конструкции имеют много общего с электродинамическими вибростендами. На пневматических стендах ударное ускорение получают при соударении стола со снарядом, выпущенным из пневматической пушки.

Характеристики некоторых ударных стендов приведены в таблице 3.7.

Приспособления для крепления изделий, испытываемых на удар, как и в случае вибрационных испытаний, должны передавать ударные воздействия к изделиям с минимально возможными искажениями. Для этого необходимо, чтобы режим возбуждения приспособления при испытании был квазистатическим, для чего должно выполняться условие $f_0 \tau \geq K$, где f_0 – собственная частота наиболее слабого звена, определяющего жесткость всего приспособления в целом; τ – наименьшая расчетная длительность импульса; K – коэффициент, зависящий от условий испытания, массы и габаритных размеров изделия, формы ударного импульса (для импульса полусинусоидальной формы принимают $K = 2.5$). Собственные частоты

приспособления и испытываемого изделия не должны совпадать друг с другом, а также с частотой основной гармоник наложенных колебаний ударного ускорения, вносимых испытательной установкой. Для трапецеидального и пилообразного импульсов принимают $f_0\tau$ более 10 и 2 соответственно.

Таблица 3.7 – Характеристики некоторых ударных стендов

Тип стенда	Грузоподъемность, Н	Число ударов в минуту	Максимальное ускорение, g	Длительность, мс	Принцип работы
УУ-50/150	5000	20...120	150	40	Механический
УУ-5/1000	50	5...80	1000	1,5...20	»
ТТ-50/500	500	10...120	500	0,6...20	»
К-5-1000	50		1000	0,5...10	Электродинамический
УУЭ-2/200	20	20...80	200	1,5...12	То же
УУЭ-20/200	200	5...80	500	1,5...40	»
УУЭ-1/6000	10	5	6000	0,1...1,0	»
К 5/3000	50		3000	0,4...11	Пневматический
К-2/3000	20		3000	0,4...12	То же

Конструкцию приспособления обычно выбирают в виде плиты, сварного куба или рамы сотовой конструкции. Наиболее широкое распространение получила сотовая конструкция, обладающая высокими точностью и механической прочностью при небольшой массе. Для повышения жесткости конструкции корпуса приспособления обычно применяют ребра жесткости, усиливающие планки. В остальном требования к конструкции приспособлений, направленные на уменьшение вносимых ими погрешностей при испытании на удар.

При измерении параметров удара необходимо регистрировать ускорение (амплитуду), длительность и форму ударного импульса. Для характеристики испытательного режима в случае, когда амплитуда

наложенных колебаний составляет более 5 % амплитуды ударного импульса, регистрируют также относительную амплитуду и частоту наложенных колебаний и время нарастания ударного ускорения. Для измерения параметров ударного импульса применяют специальную аппаратуру (рисунок 3.21).

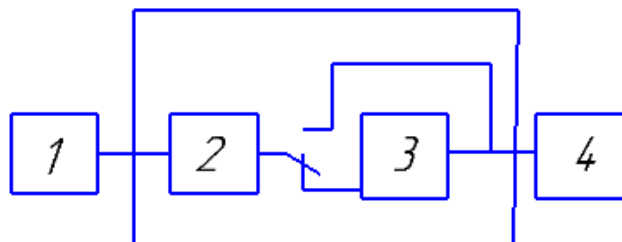


Рисунок 3.21 – Структурная схема аппаратуры для измерения параметров удара:

1 – измерительный преобразователь; 2 – согласующий усилитель; 3 – фильтр; 4 – регистрирующий прибор

Для преобразования механических колебаний в электрические используют, как правило, пьезоэлектрический датчик 1. При измерении параметров удара датчик должен быть жестко закреплен в контрольной точке. Усилитель 2 служит для согласования большого выходного сопротивления датчика с малым входным сопротивлением регистрирующего прибора 4. Для снижения уровня шумов согласующего усилителя, исключения влияния резонанса датчика и уменьшения амплитуды суперпозиции колебаний, искажающих форму ударного импульса и затрудняющих измерения, в схему включен фильтр 3, имеющий максимально достижимую равномерность частотной характеристики в полосе пропускания. На экране электронного осциллографа со ждущей разверткой и длительным послесвечением, применяемого в качестве регистрирующего прибора, непосредственно наблюдают форму ударного импульса (рисунок 3.22) и производят измерение его параметров.

Для вычисления ускорения необходимо знать- амплитуду N_{cp} (мм) усредненного ударного импульса (кривая 2 на рисунке 3.22) без учета высокочастотных накладок – суперпозиции колебаний (кривая 1); коэффициент преобразования $K_{изм}(мВ/г)$ датчика совместно с согласующим усилителем, определяемый при калибровке (напряжение и ускорение в амплитудных значениях); чувствительность ξ осциллографа по оси

$$Y(мВ/мм).$$

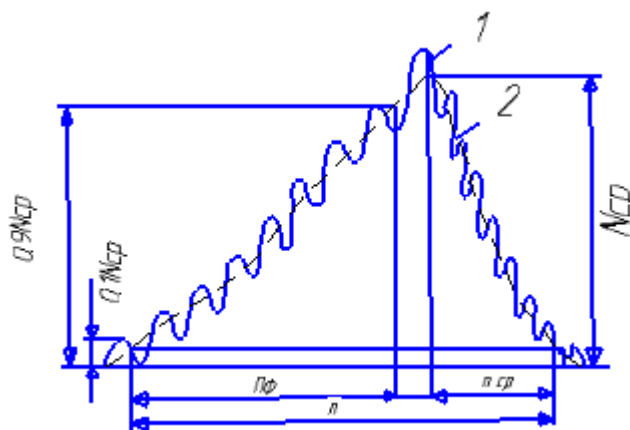


Рисунок 3.22 – Осциллограмма ударного импульса:
1 – суперпозиция колебаний; 2 – усредненный импульс

Тогда, если ударный импульс не содержит суперпозиции колебаний, в момент удара следует зафиксировать на экране осциллографа вертикальное отклонение $N_{ср}$ луча, соответствующее ускорению a , и вычислить ускорение

$$a = \xi N_{ср} / K_{изм}$$

Для измерения длительности τ ударного импульса необходимо в момент удара зафиксировать на экране осциллографа или замерить на осциллограмме горизонтальное отклонение n' (мм) луча. Тогда $\tau = \tau' n'$, где τ' – масштаб горизонтальной оси осциллографа, с/мм.

При крутых фронте и срезе импульса горизонтальное отклонение n' луча измеряют по основанию импульса, при пологих – между точками N' и N'' , расположенными на фронте и срезе импульса и соответствующими $0,1 N_{ср}$ (рисунок 3.22).

Для измерения времени τ_{ϕ} ударного импульса замеряют горизонтальное отклонение n_{ϕ} (мм) луча от фронта импульса, соответствующего $0,1 N_{ср}$, и от его уровня, соответствующего $0,9 N_{ср}$. Тогда $\tau_{\phi} = \tau' n_{\phi}$.

Оценку частоты $f_{нк}$ наложенных колебаний (суперпозиции колебаний) производят, подсчитывая число периодов этих колебаний на осциллограмме кривой ударного импульса. Для подсчета выбирают любой отрезок горизонтальной оси осциллографа длиной не менее 5 периодов наложенных колебаний. Обычно за такой отрезок принимают длительность ударного импульса. Частота наложенных колебаний

$$f_{нк} = n_T / \tau$$

где $n_{T'}$ – число периодов наложенных колебаний на выбранном отрезке осциллограммы; τ'' – время, соответствующее длине этого отрезка

Четкую картину суперпозиции колебаний наблюдают сравнительно редко. Обычно это результат наложения нескольких гармоник.

Однако существенное значение имеют одна-две гармоники, а остальные, как правило, не учитываются при расчете.

В настоящее время появились устройства, позволяющие полностью заменить измерения с помощью осциллографа. Это аналого-цифровые измерители параметров удара. Использование этих устройств позволяет повысить точность измерений, а применение цифровой техники обеспечивает большую достоверность и документальность информации, оперативную связь с ЭВМ для последующего анализа измеряемых параметров ударных процессов.

На рисунке 3.23 показана структурная схема регистрирующего прибора, реализованного на аналоговом запоминающем устройстве.

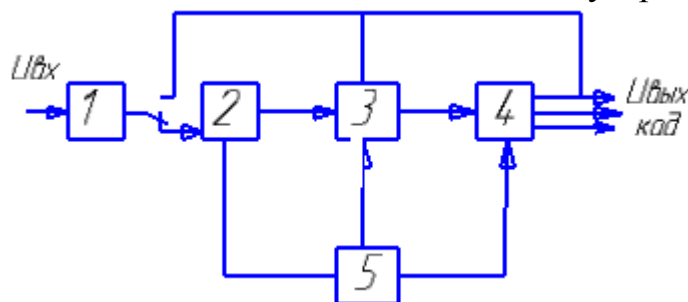


Рисунок 3.23. Структурная схема устройства для регистрации ударных процессов на аналоговых элементах памяти:

1 – входной усилитель; 2 – фиксатор уровня; 3 – аналоговое запоминающее устройство; 4 – регенерирующее устройство; 5 – блок управления

Принцип работы устройства основан на дискретизации входного импульсного сигнала и записи отдельных дискретных отсчетов последовательно в аналоговые элементы памяти (с 1-го по 129-й). Входной сигнал после регулировки начального смещения на входном усилителе 1 подается на фиксатор уровня 2, где преобразуется в ступенчатую функцию. Далее сигнал поступает на аналоговое запоминающее 3 и регенерирующее 4 устройства, что позволит многократно воспроизводить информацию. Режим работы регулируется блоком управления 5.

Приведенная схема обеспечивает считывание информации одновременно в аналоговой и цифровой форме. При считывании информации в цифровой форме регистрируемые значения выдаются в

двоично-десятичном коде. Цифровой регистратор ударных воздействий может работать в нескольких режимах; записи информации от аналого-цифрового преобразователя или от ЭВМ, вывода ее из запоминающего устройства на осциллограф или ЭВМ.

3.6. Воздействие линейной нагрузки

Испытание проводят для проверки работоспособности изделий при воздействии линейной нагрузки и после него. Испытание осуществляют на специальных стендах – центрифугах, создающих в горизонтальной плоскости радиально направленные ускорения. Частота вращения (мин-1) платформы центрифуги $n \cong 51\sqrt{a/R}$, где a – линейное (центробежное) ускорение, g ; R – расстояние от оси вращения платформы до геометрического центра изделия или его центра тяжести, см.

Испытываемое изделие располагают на столе центрифуги таким образом, чтобы разброс ускорений малогабаритного изделия относительно его центра тяжести не превышал $\pm 10\%$ ускорения в центральной точке, а для ЭС с габаритными размерами более 100 мм этот разброс может составлять от -10 до $+30\%$. Испытание обычно проводят без электрической нагрузки. Это объясняется большими погрешностями, вносимыми в контролируемый выходной сигнал при передаче его через токосъемник центрифуги. Если ЭС испытывается при электрической нагрузке, то необходимо контролировать такие параметры, по изменению которых можно судить об устойчивости к воздействию линейного ускорения изделия в целом (например, целостность электрической цепи, искажение выходного сигнала). Продолжительность испытания определяется значением линейного ускорения (таблица 3.8). При испытании с ускорением до 500 g продолжительность испытания составляет 3 мин в каждом направлении, а при ускорении свыше 500 g – 1 мин. Для установления заданного ускорения изменяют частоту вращения платформы или расстояние R от оси вращения, перемещая испытываемое изделие вдоль оси платформы.

Основные характеристики центрифуги – максимальное ускорение, грузоподъемность, число токоподводов. Некоторые типы центрифуг и их характеристики приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.8 – Значения линейных ускорений в зависимости от степеней жесткости испытаний

Степень жесткости	Линейное ускорение, g	Степень жесткости	Линейное ускорение, g
I	10	VIII	2 000
II	20	IX	5 000
III	50	X	10 000
IV	100	XI	20 000
V	200	XII	30 000
VI	500	XIII	50 000
VII	1000	XIV	100 000

Таблица 3.9 – Технические данные центрифуг

Тип центрифуги	Максимальное ускорение, g	Грузоподъемность, кг	Число токоподводов, шт	Примечание
Ц 5/300	300	5	20	Автоматическое изменение направления действия в трех взаимно перпендикулярных направлениях
Ц 5/150	150	50	31	Одновременно испытываются два изделия. Имеет поворотные столы
Ц 1/150	150	1	20	Имеет блок питания изделий
Ц 5/500	500	5	5	Погрешность установки ускорения $\pm 10\%$
Ц 100/200	200	100	-	Погрешность установки ускорения $\pm 20\%$

Конструкция центрифуги Ц 1/150 показана на рисунке 3. 24. Стол 5 представляет собой диск диаметром 570 мм, закрепленный а верх ней части вала 7, на который насажены также барабан 8, выполняющий роль шкива и

тормозного устройства, и коллектор 2. Вал установлен на двух подшипниках. Внутри вала проходят 24 провода, концы которых подсоединены к коллектору и штепсельным разъемам, расположенным возле зажимных устройств 4. В последних крепят печатные платы с испытываемыми изделиями. От каждой печатной платы проложен жгут из 12 проводов, которые через штепсельный разъем соединены с проводами, идущими от коллектора. В кожухе 1 над валом имеется отверстие для подключения тахометра. К нижнему концу вала подключают тахогенератор, служащий датчиком частоты вращения. Ротор центрифуги приводится во вращение электродвигателем 3 постоянного тока, а для его торможения служит электромагнит 9. Питание на электродвигатель подается с пульта управления, а на испытываемое изделие – от блока питания через коллектор. Доступ к столу центрифуги осуществляется через крышку.

Коллектор также закрыт крышкой (на рисунке не показана). Обе крышки имеют блокировку. Так как изделия крепят всегда на одном

и том же расстоянии от центра стола, ускорение зависит только от частоты вращения ротора.

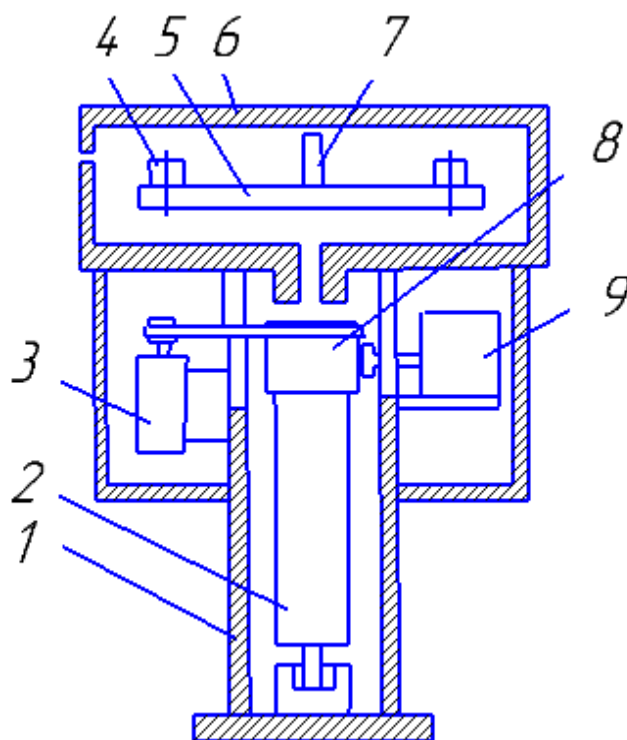


Рисунок 3.24 – Конструкция центрифуги

1 – кожух; 2 – коллектор; 3 – электродвигатель; 4 – зажимное устройство; 5 – стол; 6 – крышка; 7 – вал; 8 – барабан; 9 – электромагнит

В процессе разгона центрифуги помимо центробежных сил, определяющих линейные ускорения, возникают силы инерции, сообщающие

объекту испытания касательные ускорения, которые отсутствуют в реальных условиях эксплуатации. Касательные ускорения, оказывая дополнительное влияние на выходные параметры испытываемых ЭС, могут привести к искажению результатов испытаний. Поэтому время разгона или торможения центрифуги должно удовлетворять условию

$$\tau_{\text{л}} \geq 0.3\sqrt{R/a} \quad \text{или} \quad \tau_{\text{л}} \geq 100/n$$

где R – расстояние от оси вращения центрифуги до контрольной точки (центра тяжести испытываемого изделия), см; a – линейное ускорение, g ; n – частота вращения платформы центрифуги, мин^{-1} .

Основной элемент центрифуги – следящий привод, преобразующий входной сигнал (напряжение) двигателя в угловую скорость вала. Контролируя частоту n вращения и измеряя R , можно рассчитать линейное ускорение в контрольной точке $a = 1.12R \cdot n^2 \cdot 10^{-5}$. Так как радиус измеряется от центра тяжести испытываемого изделия, то для изделий больших размеров и для центрифуги с малым радиусом стола линейное ускорение значительно меняется вдоль изделия. Это изменение, обусловленное разностью нагрузки между двумя точками, расположенными вдоль радиуса стола центрифуги, есть градиент линейного ускорения

$$\text{grada} = a_2 - a_1 = 1.12n^2(R_2 - R_1)10^{-5},$$

где R_1 и R_2 ($R_2 > R_1$) – радиусы двух контролируемых точек испытываемого изделия.

Ясно, что для точного испытания больших изделий стол центрифуги должен иметь больший диаметр, чем размеры испытываемого изделия.

Приспособление для крепления изделия должно обладать достаточной жесткостью и допускать проведение испытаний в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Центры тяжести приспособления и закрепленного изделия должны совпадать с центром тяжести стола.

Для измерения частоты вращения наибольшее распространение получили электрические тахометры с генератором постоянного и переменного тока, импульсные и стробоскопические. Тахометры с генератором постоянного тока применяют для измерения частоты вращения с точностью $\pm(1...5) \%$. Тахометры с генератором переменного тока используют для повышения точности измерения. Импульсные и стробоскопические тахометры служат для измерения больших частот вращения.

3.7. Воздействие акустического шума

Характеристики акустического шума. Звуковая волна характеризуется рядом объективных параметров – величин, не связанных с психофизиологическим восприятием звука. Одним из них является звуковая энергия, выражаемая, как и любая другая энергия, в джоулях (Дж). Энергия, переносимая звуковой волной в единицу времени через единичную площадку S , перпендикулярную направлению распространения волны, определяет поток звуковой энергии или звуковую мощность P (Вт). Если направление распространения звуковой волны неизвестно, пользуются плотностью звуковой энергии ($\text{Дж} / \text{м}^3$), т. е. энергией звуковой волны, приходящейся на единицу объема. Распространение звуковой волны в среде создает в ней дополнительное давление, называемое звуковым давлением газа (Па). Звуковая мощность связана со звуковым давлением соотношением $P = p_{\text{эв}} S v$ где v – колебательная скорость частиц среды.

Среднюю во времени энергию, переносимую за единицу времени звуковой волной через единичную площадку S , перпендикулярную направлению распространения волны, называют интенсивностью или силой звука ($\text{Вт} / \text{м}^2$): $I = P / S = p_{\text{эв}} v$

Субъективной характеристикой звука, связанной с его интенсивностью, является громкость, зависящая от амплитуды и частоты звукового колебания. Минимально допустимое эффективное звуковое давление, при котором имеет место слуховое восприятие, называют порогом слышимости. На разных частотах порог слышимости различен. Стандартному порогу слышимости соответствует эффективное звуковое давление 2-10-5 Па при гармоническом звуковом колебании частотой 1 кГц. Максимально допустимое эффективное звуковое давление, превышение которого вызывает ощущение боли в ухе, называют порогом болевого ощущения или болевым порогом. Стандартному болевому порогу соответствует эффективное давление 20 Па при гармоническом звуковом колебании частотой 1 кГц.

Для характеристики величин, определяющих восприятие звука, существенны не столько абсолютные значения интенсивности звука и звукового давления, сколько их отношения к пороговым значениям. Поэтому на практике вводят понятия относительных уровней интенсивности звука и звукового давления. Если интенсивности двух звуковых волн равны I и I_0 , то разностью уровней этих интенсивностей называют логарифм отношения

I/I_0 . За единицу разности уровней принимают бел (Б) – разность уровней двух интенсивностей (или давлений), отношение которых равно десяти, соответственно десятичный логарифм отношения равен единице. Десятую часть бела, соответствующую логарифму отношения, равному 0,1, называют децибелом (дБ). Измеренная в децибелах разность уровней интенсивностей и давлений определяется формулой

$$L = L = 10 \lg(I / I_0) = 20 \lg(p_{эв} / p_0),$$

где I и $p_{эв}$ – текущие значения интенсивности звука и звукового давления;
 I_0 и p_0 значения указанных величин, соответствующие порогу слышимости

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт / м}^2; p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}.$$

Методы испытания. Испытание на воздействие акустического шума повышенного уровня проводят с целью определения способности ЭС выполнять в условиях данного воздействия свои функции и сохранять параметры в пределах норм, указанных в программе испытаний и ТУ. Для проведения данного испытания необходимо создавать звуковое давление до 175 дБ в широком диапазоне частот.

Акустические нагрузки имеют свои особенности – широкий спектр частот (от единиц герц до нескольких килогерц), случайный характер изменения во времени и пространстве. В отличие от чисто механических воздействий, при которых вибрация передается изделиям главным образом через точки крепления, звуковое давление возбуждает детали ЭС с помощью распределенного усилия, значение которого зависит не только от уровня звукового давления, но и от площади каждой детали. Это приводит к тому, что средства защиты от действия вибраций в данном случае оказываются неэффективными. Наиболее критическим для ЭС является совместное воздействие вибраций и звукового давления акустического шума, при котором могут возникать резонансные явления в деталях ЭС, как правило, на частотах 1500... 2000 Гц.

При испытании на акустические нагрузки на ЭС воздействует случайный акустический шум или акустический тон (гармоническое звуковое колебание определенной частоты) меняющейся частоты. Режим испытания в обоих случаях определяется заданным уровнем звукового давления для соответствующей степени жесткости (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Зависимость звукового давления от степени жесткости испытаний

Степень жесткости	Акустический шум, дБ	Акустический тон меняющейся частоты, дБ»
I	130	120
II	140	130
III	150	140
IV	160	150
V	170	160

Испытание на воздействие случайного акустического шума проводят путем воздействия на ЭС шума с заданным равномерным звуковым давлением в определенном спектре частот, взятом из диапазона 125...10000 Гц. Продолжительность воздействия акустического шума должна составлять 5 мин, если не требуется большее время для контроля и/или измерения параметров изделия. При испытании необходимо выявить резонансные частоты изделия, на которых амплитуда колебаний точек крепления максимальна, и проводить контроль параметров ЭС. Для контроля рекомендуется выбирать такие параметры, по изменению которых можно судить об устойчивости к воздействию акустического шума ЭС в целом (например, искажение выходного сигнала или изменение его значения, целостность электрической цепи).

Испытание на воздействие акустического тона меняющейся частоты проводят в том же диапазоне частот при плавном изменении частоты от низшей к высшей и наоборот (один цикл) по всему диапазону. При этом в диапазоне частот 200... 1000 Гц уровень звукового давления должен соответствовать указанному в таблице 3.10. На частотах ниже 200 Гц и выше 1000 Гц должно происходить климатических испытаний, включающая испытание придать снижение уровня на 6 дБ/окт. относительно уровня на частоте 1000 Гц. Испытание проводят в течение 30 мин, если не требуется большее время для контроля параметров ЭС. При регистрации параметров ЭС определяют их изменения как функцию частоты акустического воздействия.

Первый из рассмотренных методов предпочтительнее, когда испытываемые изделия имеют несколько собственных резонансных частот и сложную конструкцию, второй – при испытании простых по конструкции

изделий, которые не имеют резонансных частот или число их мало в диапазоне до 10 000 Гц, а также когда необходимо выявить элементы конструкции, критичные к воздействию звукового давления определенной частоты.

Устройства для испытания. Испытание изделия на воздействие акустического шума осуществляют: на открытом стенде с работающим двигателем, в закрытых блоках с натурным источником шума, в акустических камерах. На открытом стенде с работающим двигателем испытывают крупногабаритные изделия. Требуемые уровни нагрузок достигаются соответствующим расположением испытываемых ЭС относительно источника шума. Испытание в закрытых блоках проводят при более высоких акустических нагрузках. При этом звуковое поле несколько искажается по сравнению с условиями эксплуатации.

Широкое распространение получили испытания изделий в реверберационных акустических камерах. Важнейшей целью при проектировании таких камер является достижение диффузного звукового поля в рабочем диапазоне частот. Это означает, что все моды акустического тона равномерно распределены по частоте и все направления распространения звуковой энергии равновероятны. Диффузность звукового поля обеспечивается оптимальной формой и достаточно большим объемом камеры, высокой отражательной способностью внутренних поверхностей, соответствующим выбором и расположением рупоров (согласующих устройств) и источников шума. Предпочтительная форма камеры – неправильный пятиугольник, размеры сторон которого превышают наибольшие габаритные размеры испытываемого изделия не менее чем в два раза.

В качестве звуковых источников используют сирены высокой мощности, приводимые в действие сжатым воздухом, или мощные громкоговорители. Суммарная акустическая мощность источников шума в соответствующих полосах частот должна быть распределена на минимальное число рупоров. При этом необходима высокая эффективность излучения звука рупора, геометрические размеры которого выбирают из условия

$$d \geq c / (f_{крп})$$

где d – диаметр выходного сечения рупора; c – скорость звука; $f_{крп}$ – критическая частота рупора, ниже которой эффективность излучения резко падает.

Чтобы обеспечить хорошую акустическую связь реверберационной камеры с источниками шума, рупоры рекомендуется располагать вблизи

углов камеры. Для получения высокого звукового давления в качестве возбудителя применяют генераторы звука. Принцип действия их основан на преобразовании кинетической энергии струи воздуха (газа) в акустическую энергию большой мощности. Число генераторов звука, их частотный диапазон и мощность выбирают из условия воспроизведения нагрузок в широком спектре частот с неравномерной спектральной плотностью. Для одного источника энергии средний уровень звукового давления в камере может быть найден из уравнения

$$A = 10 \lg W - 10 \lg a + 136,$$

где A – уровень звуковой энергии, дБ, при $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Па}$; W – мощность генератора, Вт; a – общее поглощение звука, дБ (1 дБ определяется как эквивалент поглощения звука 929 см^2 совершенно черной поверхности).

Согласованное (программное) управление генераторами, формирующими спектр звуковых давлений, осуществляют при помощи многоканальной управляющей системы (рисунок 3.25).

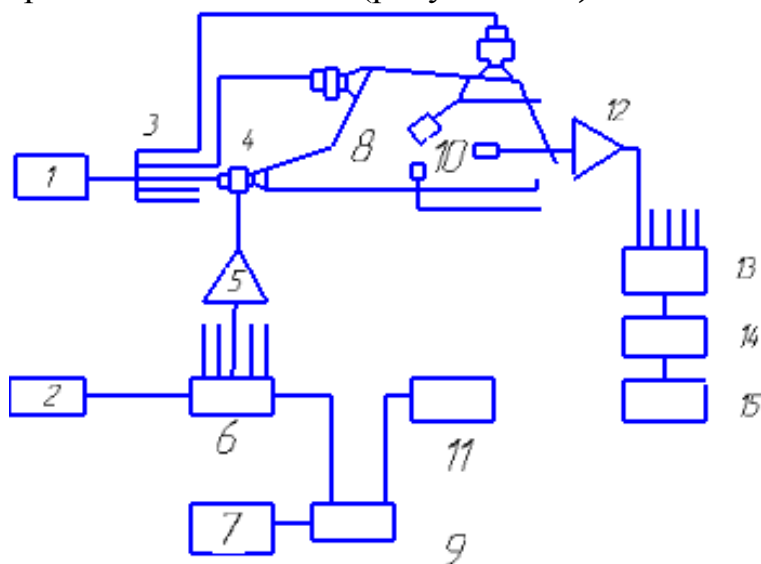


Рисунок 3.25 – Структурная схема многоканальной системы управления реверберационной камерой:

1 – источник питания сирен сжатым воздухом; 2 – генератор шума; 3 – воздухораспределительные устройства; 4 – сирены; 5 – усилитель мощности сирены; 6 – устройство формирования спектра звукового давления; 7 – стойка управления; 8 – камера; 9 – ЭВМ; 10 – микрофоны; 11 – графопостроитель; 12 – микрофонный усилитель; 13 – коммутатор; 14 – анализатор спектра; 15 – детектор

При использовании электропневматических генераторов исходный сигнал задается генератором белого шума 2, имеющего полосу частот 20 Гц.

20 кГц. Из этой широкой полосы частот при помощи фильтров устройства 6 выделяют ряд более узких полос (чаще всего третьоктавных). В каждой полосе уровень звукового давления может регулироваться в пределах 40... 60 дБ. Просуммированный на выходе фильтров формируемый сигнал поступает в параллельно включенные усилители мощности 5 генераторов звука – сирен 4, создающих акустическое поле в камере 8. Акустическая мощность генератора в основном определяется перепадом давления на входе и выходе модулирующего клапана. Поэтому в каждом генераторе предусмотрен независимый канал управления сжатым воздухом, включающий обычные для воздухораспределительных систем устройства; электрозадвижку, дроссель, регулятор давления, воздушный фильтр, ресивер.

В качестве датчиков обратной связи в системе регулирования используют микрофоны 10, устанавливаемые в контрольных точках бокса. Достаточно хорошее приближение к требуемым характеристикам акустического нагружения можно получить используя десять микрофонов. Для ввода в систему регулирования сигналы, поступающие от микрофонов, усиливаются и усредняются и, пройдя коммутатор 13, подаются в полосовой анализатор спектра 14, аналогичный по составу анализатору устройства 6. С выхода среднеквадратического детектора сигналы поступают на мини-ЭВМ 9, где в каждой полосе они сравниваются с заданными. В результате вырабатывается сигнал корректировки, который подается на усилители задающих фильтров устройства 6, благодаря чему автоматически поддерживается звуковое давление в камере. Одно из основных достоинств данной автоматической системы регулирования – быстрота настройки объекта на требуемый режим испытания.

Обычно при испытании измеряют звуковое давление, деформацию и вибрацию. Для этого в комплекс технологического оборудования камеры включают систему сбора, измерений и обработки данных с использованием ЭВМ. Эта система позволяет контролировать средние квадратические значения измеряемых величин в ходе эксперимента, регистрировать процессы на магнитной ленте и затем обрабатывать их на анализаторах с высокой разрешающей способностью.

Контрольные вопросы

1. Какие виды испытания на механические воздействия Вы знаете?
2. Чем отличаются программы испытания на механические воздействия опытных образцов и серийно выпускаемых ЭС?

3. Какие существуют виды вибрации и каковы их основные характеристики?
4. В чем различие между виброустойчивостью и вибропрочностью ЭС?
5. Какие методы испытаний на виброустойчивость и вибропрочность Вы знаете и каков принцип их проведения?
6. Какому из двух методов испытания Вы отдадите предпочтение: методу качающейся частоты или методу фиксированных частот? Обоснуйте свой выбор.
7. В чем особенность метода испытания ЭС на широкополосную случайную вибрацию?
8. Каков принцип действия электродинамического вибростенда?
9. Как можно обеспечить постоянную спектральную плотность ускорения в требуемом диапазоне частот испытания ЭС методом широкополосной случайной вибрации?
10. Каковы основные требования к приспособлениям, предназначенным для крепления ЭС к столу вибростенда? Каковы способы крепления испытываемых ЭС?
11. Какие методы измерения параметров вибрации Вы знаете и каковы их особенности?
12. Что понимают под реакцией ЭС на воздействие ударного импульса и какие основные виды реакций Вам известны?
13. Какие области можно выделить на ударных спектрах и каково влияние длительности и формы ударного импульса на результаты испытания ЭС в этих областях?
14. В чем отличие испытания на ударную прочность от испытания на ударную устойчивость?
15. Поясните принцип действия ударного стенда кулачкового типа.
16. Как обеспечить заданные параметры и форму ударного импульса при испытании ЭС на ударном стенде?
17. Как определяют параметры ударного импульса в процессе испытания ЭС?
18. Как устанавливают заданные линейные ускорения при испытании ЭС и как их контролируют?
19. В чем специфика акустических воздействий?
20. Какие методы испытания ЭС на воздействие акустического шума Вам известны? В чем сущность этих методов?

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

1945–1966 РЛПУ (кафедра радиолокационных приборов и устройств).

Решением Советского правительства в августе 1945 г. в ЛИТМО был открыт факультет электроприборостроения. Приказом по институту от 17 сентября 1945 г. на этом факультете была организована кафедра радиолокационных приборов и устройств, которая стала готовить инженеров, специализирующихся в новых направлениях радиоэлектронной техники, таких как радиолокация, радиоуправление, теленавешение и др. Организатором и первым заведующим кафедрой был д. т. н., профессор С. И. Зилитинкевич (до 1951 г.). Выпускникам кафедры присваивалась квалификация инженер-радиомеханик, а с 1956 г. - радиоинженер (специальность 0705).

В разные годы кафедрой заведовали доцент Б. С. Мишин, доцент И. П. Захаров, доцент А. Н. Иванов.

1966–1970 КиПРЭА (кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры).

Каждый учебный план специальности 0705 коренным образом отличался от предыдущих планов радиотехнической специальности своей четко выраженной конструкторско-технологической направленностью. Оканчивающим институт по этой специальности присваивалась квалификация инженер-конструктор-технолог РЭА.

Заведовал кафедрой доцент А. Н. Иванов.

1970–1988 КиПЭВА (кафедра конструирования и производства электронной вычислительной аппаратуры).

Бурное развитие электронной вычислительной техники и внедрение ее во все отрасли народного хозяйства потребовали от отечественной радиоэлектронной промышленности решения новых ответственных задач. Кафедра стала готовить инженеров по специальности 0648. Подготовка проводилась по двум направлениям - автоматизация конструирования ЭВА и технология микросистемных устройств ЭВА.

Заведовали кафедрой: д. т. н., проф. В. В.Новиков (до 1976 г.), затем проф. Г. А. Петухов.

1988–1997 МАП (кафедра микроэлектроники и автоматизации проектирования).

Кафедра выпускала инженеров, конструкторов, технологов по микроэлектронике и автоматизации проектирования вычислительных средств (специальность 2205). Выпускники этой кафедры имеют хорошую технологическую подготовку и успешно работают как в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, так и при их проектировании, используя современные методы автоматизации проектирования. Инженеры специальности 2205 требуются микроэлектронной промышленности и предприятиям-разработчикам вычислительных систем.

Кафедрой с 1988 г. по 1992 г. руководил проф. С. А. Арустамов, затем снова проф. Г. А. Петухов.

С 1997 ПКС (кафедра проектирования компьютерных систем). Кафедра выпускает инженеров по специальности 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Область профессиональной деятельности выпускников включает в себя проектирование, конструирование и технологию электронных средств, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, проекта и условиям эксплуатации. Кроме того, кафедра готовит специалистов по защите информации, специальность 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Объектами профессиональной деятельности специалиста по защите информации являются методы, средства и системы обеспечения защиты информации на объектах информатизации.

С 1996 г. кафедрой заведует д. т. н., профессор Ю.А. Гатчин. За время своего существования кафедра выпустила 4364 инженеров. На кафедре защищено 65 кандидатских и семь докторских диссертаций.

На кафедре Проектирования Компьютерных систем осуществляется магистратурская подготовка по направлению 210200.05 «Информационные технологии и проектирование электронных средств».

2011 – переименование

Приказом №527-од от 07.10.2011 кафедра проектирования компьютерных систем переименована в кафедру проектирования и безопасности компьютерных систем (сокращенно — ПБКС).

С 2013 г. на кафедре ведется подготовка бакалавров по направлению 10.03.01 «Информационная безопасность» и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткалич В.Л., Лабковская Р.Я. Обработка результатов технических измерений: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 72 с.
2. Лабковская Р.Я. Метрология и электрорадиоизмерения: Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 140 с.
3. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 336 с.: ил.
4. Канке А.А., Кошечая И.П. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник, ВУЗ. – Издательство: Форум, Инфра-М, 2010. – 416 с.
5. Марусина М.Я., Воронцов Е.А., Казначеева А.О., Скалецкая Н.Д. Методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы студентов по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 49 с.
6. Скалецкая Н.Д. Практические занятия по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация». – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 40 с.
7. Кузнецов В.И. Радиосвязь в условиях радиоэлектронной борьбы. – Воронеж.: ВНИИС, 2002. – 403 с.
8. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник для вузов. – СПб: Питер, 2010. – 464 с.
9. Белобрагин, В.Я. Основы технического регулирования: учебное пособие для вузов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 319 с.
10. Ким К.К. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника. – СПб: Питер, 2006. – 367 с.
11. Сергеев А.Г., Латышев М.В. Метрология. Стандартизация. Сертификация: учебное пособие для вузов. – М.: ЛОГОС, 2005. – 559 с.
12. Дворяшин Б.В. Метрология и радиоизмерения: Учебное пособие для студентов ВУЗов. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
13. Клевлеев В.М. и др. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник – М.: ИНФРА-М, 2004. – 256 с.
14. Заляева Г. О. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебно-методическое пособие (практикум). – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2006. – 124 с.

15. Гончаров А. А. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – М.: Академия, 2008. – 240 с.
16. Схиртладзе А. Г., Радкевич Я. М. Метрология, стандартизация и технические измерения. – Старый Оскол: ТНТ, 2010. – 420 с.
17. А. Г. Сергеев, В. В. Крохин Метрология. – М.: «Логос», 2001. – 408 с.
18. Новиков Г. А. Основы метрологии / Учеб. пособие – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 182 с.
19. Горбоконенко, В. Д. Метрология в вопросах и ответах / В. Д. Горбоконенко, В. Е. Шикина – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 196 с.
20. Анцыферов С. С., Голубь Б. И. Общая теория измерений: Учебное пособие. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 176 с.
21. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. – СПб: Питер, 2010. – 192 с.
22. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации и метрологии. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 479 с.
23. Кушнир Ф.В. Электрорадиоизмерения. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
24. Мирский Г.Я. Микропроцессоры в измерительных приборах. – М.: Радио и связь, 1984. – 160 с.
25. Мирский Г.Я. Электронные измерения. – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.
26. ГОСТ 16263-70 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения».
27. ГОСТ 8.011-72 «Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности измерений и формы представления результатов измерений».

Лабковская Римма Яновна

Методы и устройства испытаний ЭВС

Часть 1

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49