

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Под редакцией доктора технических наук
Н.В. Холодкова**

**Рекомендовано
Государственным комитетом Российской Федерации
по высшему образованию
в качестве учебника для студентов высших
технических учебных заведений**



**МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО МАИ
1994**

ББК 27.5.14.4

Э41

УДК 629.7.01

Федеральная целевая программа книгоиздания России

А в т о р ы:

В.А. Афанасьев, В.С. Барсуков, М.Я. Гофин,
Ю.В. Захаров, А.Н. Стрельченко, Н.П. Шалунов

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра летательных аппаратов и двигателей
Санкт-Петербургского механического института;
генеральный конструктор *Г.А. Ефремов*

Э41 Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов/ В.А. Афанасьев, В.С. Барсуков, М.Я. Гофин, Ю.В. Захаров, А.Н. Стрельченко, Н.П. Шалунов; Под редакцией Н.В. Холодкова. — М.: Изд-во МАИ, 1994. — 412 с. : ил.

ISBN 5-7035-0318-3.

Подробно рассматриваются вопросы методологии испытаний летательного аппарата как сложной технической системы, основные этапы и виды испытаний при разработке и создании новых конструкций, проблемы автоматизации испытаний.

Учебник предназначен для студентов вузов и специалистов, занимающихся проблемами испытаний летательных аппаратов.

Э $\frac{2705140400-34}{094(02)94}$ 21—91

ББК 27.5.14:4

ISBN 5—7035—0318—3

©В.А. Афанасьев, В.С. Барсуков,
М.Я. Гофин, Ю.В. Захаров,
А.Н. Стрельченко, Н.П. Шалунов,
1994

ПРЕДИСЛОВИЕ

Процесс создания космического летательного аппарата (КЛА) и наземного комплекса включает в себя следующие основные этапы, связанные с проектированием, изготовлением и экспериментальной отработкой отдельных агрегатов, систем и всего комплекса в целом: научно-исследовательские работы, опытно-конструкторские работы, серийное производство и эксплуатацию. На всех этих этапах проводится большое количество испытаний, различных по целям, задачам, методам, уровню проведения, стоимости и т.п. Затраты на проведение испытаний могут составлять до 80% стоимости всех работ по созданию современного ракетно-космического комплекса (РКК).

Очень часто в научной и учебной литературе в качестве синонима термина «испытание» используются такие термины, как эксперимент, экспериментальное исследование или контроль. Отсутствие единой терминологии в значительной степени затрудняет создание приемлемой теории испытаний, которая позволила бы оптимизировать процесс испытаний летательных аппаратов (ЛА) и их систем.

В данной книге испытания рассматриваются как процесс экспериментальной отработки, и поэтому в ней анализируются в основном инженерно-технические вопросы отработки ЛА и их систем, методы и средства проведения испытаний, вопросы определения необходимого числа экспериментов, выбора определяющих параметров, подлежащих контролю и анализу, а также вопросы автоматизации сбора и обработки поступающей информации.

Учебник написан по программам курсов «Теория испытания комплексов ЛА», «Методы и средства стендовых испытаний», «Автоматизация испытаний», читаемых для студентов специальности «Инженер-испытатель по летательным аппаратам и их системам».

Предисловие и разд. 2.1 — 2.4, 2.9 написаны В.А. Афанасьевым и В.С. Барсуковым, разд. 1.1 — В.А. Афанасьевым и А.Н. Стрельченко, введение и разд. 1.5 — В.А. Афанасьевым, разд. 1.2 — 1.4 и гл. 3 — А.Н. Стрельченко, разд. 2.5 и 2.8 — М.Я. Гофиним, разд. 2.2.2 — 2.2.4, 2.6 и 2.7 — Ю.В. Захаровым, гл. 4 — Н.П. Шалуновым.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка, создание и эксплуатация КЛА связаны с необходимостью взаимной увязки функционирования элементов сложных ракетно-космических комплексов: транспортных ракет (ракет-носителей), полезной нагрузки, наземных средств обеспечения транспортировки, монтажа и подготовки ракет к запуску, стартовых сооружений и средств командно-информационного обеспечения запусков.

РКК различного назначения (см. рисунок) принято объединять понятием «ракетно-космическая система» (РКС). Особенностью некоторых РКС является возможность создания на орбите искусственного спутника Земли орбитальных космических комплексов (ОКК) путем стыковки и сборки орбитальных станций, транспортных кораблей, космических аппаратов и длительной их эксплуатации как с участием человека, так и в автоматическом режиме. В состав ОКК помимо орбитальных объектов включаются службы управления полетом.

Центр управления полетом (ЦУП) объединяет командно-измерительный комплекс с наземными пунктами, координационно-вычислительные центры с мощными ЭВМ и другой техникой оперативной обработки внешнетраекторной и телеметрической информации, а также поисково-спасательные средства и группы для обеспечения приземления и эвакуации экипажей и техники, возвращающихся из космоса.

Количество возможных разновидностей РКК чрезвычайно велико. Их можно систематизировать по виду ракет-носителей [46].

По грузоподъемности ракеты-носителя РКК могут классифицироваться на тяжелые, средние и легкие, по кратности повторного использования — на одноразовые и многоразовые.

Современные ракеты-носители позволяют доставлять на базовые орбиты массы полезной нагрузки до 100 000 кг, многоразовая космическая система типа «Спейс Шаттл» — до 29 500 кг.

Ракету-носитель можно разделить на две основные части: *ракетную часть*, состоящую из ракетных блоков, заканчивающих свое функционирование в конце активного участка траектории, и *отделяемую орбитальную часть* с космическими ракетными блоками и целевыми аппаратами, выводимыми на околоземную орбиту. Такое разделение позволяет выявить основные виды нагрузок, действующих на эти две части. Ракетная часть при этом рассчитывается на нагрузки, действующие на активном участке траектории. Спускаемые аппараты орбитальной ступени рассчитываются на нагрузки, действующие на траектории движения до места назначения. Наибольшие статические, дина-

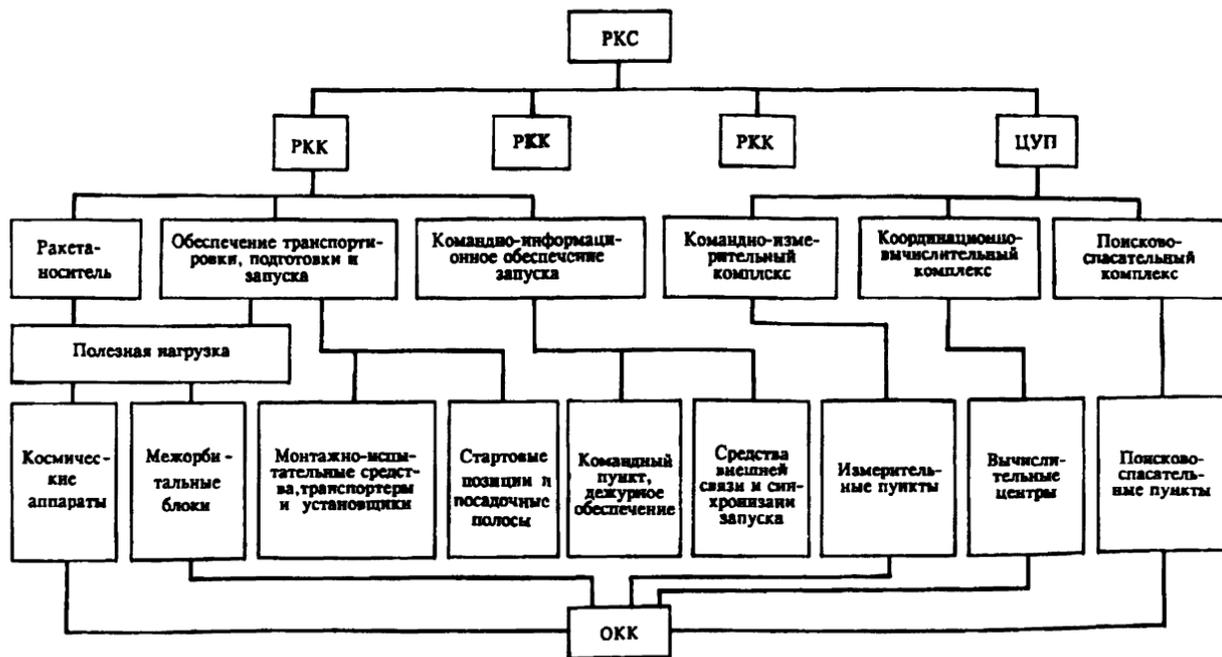


Рис. 01. Структурная схема ракетно-космической системы

мические и тепловые нагрузки действуют на конструкции спускаемых аппаратов при их движении в плотных слоях атмосферы Земли или других планет.

Основной ракет-носителей являются их двигательные установки (ДУ) — сложные технические системы, включающие в себя ряд подсистем и устройств, обеспечивающих работоспособность и требуемую надежность жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) при запуске, маршевом режиме и при выключении.

В качестве примера ракеты-носителя общего назначения можно привести компоновочную схему «Спутник».

Компоновка и конструкция отделяемой головной части зависят от назначения и состава размещаемой в ней полезной нагрузки и сопряжения ее с ракетной частью. Для исключения воздействия больших силовых и тепловых нагрузок при движении первой ступени ракеты на активном участке траектории целесообразно защитить ракетно-космические блоки, сбрасываемые после прохождения обтекателем плотных слоев атмосферы.

Полезной нагрузкой могут быть: спускаемые аппараты с человеком на борту; орбитальные станции; траекторные аппараты; спутники связи; метеорологические спутники; спутники, используемые в народно-хозяйственных целях, — для картографии сельского хозяйства, определения районов, пригодных для земледелия, обследования лесного хозяйства, океанографии, ледовой разведки, исследования нефтяных загрязнений и загрязнений воздуха и т.д.

Рассмотрим основные виды полезной нагрузки как объекта экспериментальной отработки, т.е. их основное функциональное назначение, особенности и условия работы.

Основное функциональное назначение спускаемого аппарата космического корабля «Восток» заключается в обеспечении надежного полета человека в космическом пространстве и возвращения его на Землю. Для выполнения функционального назначения этот аппарат был снабжен следующими основными системами: системой жизнеобеспечения, химическими источниками питания для радиоустановки и приборов, тормозной двигательной установкой для уменьшения скорости космического корабля при переходе на траекторию спуска с орбиты, небольшими двигателями ориентации, системой обеспечения мягкой посадки.

Характерные условия работы аппаратов этого класса — глубокий вакуум и малые значения гравитационных сил Земли на орбитальном участке полета, большие значения линейных перегрузок, высокие температуры на поверхности теплозащитных покрытий спускаемого аппарата при входе в атмосферу.

Большое значение во многих отраслях хозяйства имеют спутники связи. Обеспечивать такую связь спутники могут в том случае, если

они неподвижны относительно Земли, т.е. находятся на геосинхронной, геостационарной орбите. При движении по круговой орбите высотой 25 880 км один виток совершается за 24 ч, т.е. за период суточного вращения Земли. Спутник, движущийся по такой орбите, будет постоянно находиться над определенной точкой поверхности Земли. Такие аппараты эксплуатируются в основном в условиях орбитального полета.

Система «Экран» осуществляет передачу программ телевидения между Москвой, Сибирью и Крайним Севером. Суда, находящиеся в арктических водах в пределах радиовидимости спутника, также принимают эти программы.

Для обеспечения ежедневных глобальных наблюдений погоды с непрерывной информацией используются метеорологические спутники. В настоящее время спутники «Метеор», находящиеся на полярной орбите, постоянно наблюдают за Землей, ежечасно охватывая территорию площадью 30 000 кв. м. Находясь на теневой стороне Земли, спутники получают изображение с помощью инфракрасных датчиков, реагирующих на тепловое излучение поверхности Земли, океанов и облаков. Основные приборы для наблюдения поверхности Земли — телевизионная система получения изображений и инфракрасный радиометр. Метеорологические спутники эксплуатируются в условиях орбитального полета.

В качестве основного направления развития космонавтики в нашей стране рассматривается создание орбитальных станций, которые могли бы стыковаться в космосе. Основным назначением космических орбитальных станций типа «Салют», «Мир» является обеспечение условий для длительного пребывания космонавтов в космосе. Орбитальные станции работают в условиях глубокого вакуума, малых значений гравитационных сил Земли, воздействия солнечного излучения и других факторов, свойственных космическому пространству.

С целью выяснения возможности длительной работы человека в космосе была создана серия орбитальных научных станций «Салют». Конструктивно станция «Салют-1» состояла из трех основных отсеков цилиндрической формы различного диаметра. На переднем торце станции размещались герметичный люк-лаз и переходной отсек, через который экипаж корабля «Союз» после стыковки попадал внутрь станции.

В настоящее время исследования внеземных миров возможны лишь с помощью автоматических межпланетных станций (АМС) — космических ЛА, передающих информацию на Землю. АМС состоит из двух основных частей: части, непосредственно обеспечивающей полет от одной планеты к другой, и спускаемого аппарата. ЛА такого типа в основном будут эксплуатироваться в условиях межпланетного космического пространства и атмосферы той планеты, куда направлена АМС.

Во время снижения спускаемых аппаратов с помощью установленных на борту научных приборов проводились комплексные исследования химического и изотопного состава атмосферы и облаков, структуры облачного слоя, а также эксперименты по спектральному анализу рассеянного солнечного излучения и регистрации электрических разрядов в атмосфере.

Создание и запуск пилотируемого многоразового транспортного космического корабля (МТКК) явились началом нового этапа в освоении космического пространства. В состав МТКК входит орбитальная ступень (космический самолет), ракетные ускорители и топливный бак.

Основное отличие многоразовой космической системы от одноразовой заключается в том, что орбитальную ступень системы можно использовать для повторных полетов. Поэтому условия работы орбитальной ступени определяются главным образом воздействием внешних нагрузок, характерных для этапа старта и вывода орбитальной ступени в космос, орбитального полета, входа в плотные слои атмосферы, посадки, транспортировки, хранения и повторной подготовки к запуску.

Важными объектами экспериментальной отработки являются комплекс наземного оборудования, обеспечивающий предстартовую подготовку и пуск РКК, траекторные измерения, выдачу команд, прием и обработку телеметрической информации, а также земельные и водные участки для падения отработавших ступеней ракет-носителей и для посадки возвращаемых космических объектов. Обычно такой комплекс называется космодромом.

В состав космодрома входят: техническая позиция, стартовая позиция, командно-измерительный комплекс, комплекс средств поиска и спасения, жилой комплекс и вспомогательные службы и системы.

Техническая позиция позволяет обеспечивать прием, хранение, сборку и испытание ракет-носителей и космических объектов, заправку космических объектов компонентами топлива и сжатыми газами и пристыковку их к ракетам-носителям.

Стартовая позиция служит для доставки РКК с технической позиции, их установки на пусковую систему, испытаний, предстартовой подготовки, заправки компонентами топлива и сжатыми газами, наведения и пуска.

Командно-измерительный комплекс наземных станций или специально оборудованных судов предназначен для траекторных измерений, подачи команд, приема и обработки поступающей телеметрической информации. Аппаратура командно-измерительного комплекса состоит из радиотелеметрических станций, радиоприемных и радиопередающих устройств, антенн, телевизионных установок, линий автоматической обработки получаемых данных и математических вычислитель-

ных машин, аппаратуры службы единого времени, средств связи, источников электроэнергии и т.д.

Комплекс средств поиска и спасения возвращаемых космических объектов и их экипажей включает в себя специально оборудованные суда, самолеты, вертолеты, радиостанции, аппаратуру визуального наблюдения и другие средства, необходимые для поиска, обнаружения, обслуживания, эвакуации космических объектов и спасения экипажей.

Из сказанного можно сделать вывод, что РКС представляет собой сложную техническую систему. Поэтому при экспериментальной отработке таких систем необходимо опираться на теоретические основы планирования, проведения и анализа результатов испытаний сложных технических систем.

Глава 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Ракетно-космический комплекс как сложная техническая система

Сложная техническая система представляет собой составной объект, части которого можно рассматривать как системы, закономерно объединенные в целое в соответствии с определенными принципами и подчиненные цели функционирования всей сложной системы.

Основными признаками сложной технической системы являются:

1. Наличие большого количества взаимосвязанных и взаимодействующих между собой подсистем, каждую из которых, в свою очередь, можно расчленить на более мелкие подсистемы и т.д., вплоть до подсистем первого уровня — элементов.

2. Сложность выполняемой системной функции, направленной на достижение заданной цели.

3. Наличие управления (часто имеющего иерархическую структуру), разветвленной информационной сети и интенсивных потоков информации.

4. Взаимодействие с внешней средой и функционирование в условиях воздействия случайных факторов.

На рис. 1.1 показана структурная схема сложной технической системы.

Функционально связанные элементы,

соединенные между собой, образуют монтажные узлы, которые полностью собираются вне изделия и испытываются на специальных стендах, а затем монтируются в агрегаты. Из агрегатов, в свою очередь, образуются подсистемы более высокого уровня — самостоятельно функционирующие части системы.



Рис.1.1 Структурная схема сложной технической системы

Ввиду сложности и новизны современных РКК в настоящее время нельзя точно рассчитать динамические процессы, происходящие в комплексе, и надежность его функционирования. Это объясняется неполнотой исходных данных о действительных режимах работы системы в натуральных условиях: о внезапных резких перепадах температуры, о вибрационных, ударных и других воздействиях, а также о сложных случайных взаимодействиях подсистем, в особенности на переходных нестационарных режимах пуска ЛА, включения и выключения двигательных установок и др.

При создании комплексов необходимо учитывать не только характеристики отдельных подсистем, но и особенности их взаимодействия. Даже если определенная подсистема сама по себе обладает несомненными достоинствами, от нее придется отказаться, если она несовместима с другими подсистемами и ухудшает общие характеристики ЛА.

1.1.1.

Виды взаимодействий в сложной системе

Рассмотрим примеры возможных взаимодействий в системах и между системами в составе комплекса.

В общем случае воздействие может состоять в передаче вещества, энергии, информации. Типовыми взаимодействиями в ЛА могут быть механические, электрические, электромагнитные, взаимодействия в системе «человек — машина» и т.д.

Механические взаимодействия возникают в том случае, когда отдельные элементы соединены друг с другом механической связью или упругой средой, когда они генерируют или передают механические или акустические колебания.

Наиболее сложными являются взаимодействия при нестационарных, случайных процессах, вибрационных и ударных нагрузках, связанных с изменением режимов полета. Лучшим способом изучения механических взаимодействий является создание натуральных стендов.

В сложных системах электрическая энергия, предназначенная для питания или передачи управляющего информационного сигнала от одного элемента, может быть ошибочно, случайно подведена к другому элементу. Такая ошибка наиболее вероятна при сборке очень большого числа разветвленной электрокабельной сети, и в особенности при наличии разъемов блоков и штеккеров кабельной сети. Обычно в практических условиях электрические системы изолируют друг от друга. Однако это не всегда легко осуществить, поэтому схемы электросистем нужно тщательно исследовать, чтобы выявить случайные

паразитные связи, нарушение изоляции с замыканием на корпус и с другой системой, а также те элементы, которые при незначительных изменениях параметров цепи могут выйти из строя. Существует также связь между оборудованием для генерирования или преобразования электрической энергии и разного рода электрическими нагрузками. Очевидно, что это оборудование и нагрузки должны быть совместимы. Возможны также случаи, когда два разных потребителя не должны подключаться к одной и той же электрической цепи. Для проектирования и отработки электрических систем необходимо создавать электромоделирующие стенды.

КЛА, ракета-носитель, наземное испытательно-пусковое оборудование и командно-измерительный комплекс обычно заполнены электронным оборудованием различных типов. Вследствие этого возможно возникновение сложных индуктивных и электромагнитных связей при совместной работе радиотехнических, навигационных, командно-исполнительных, измерительных и других систем. Правильный выбор конструкции и рабочих частот, изоляция и экранирование электронного оборудования позволяют уменьшить индуктивные и электронные взаимовлияния и помехи. Чтобы уменьшить до приемлемого уровня взаимовлияние отдельных электронных и электрических устройств, смонтированных на ЛА, приходится проводить в большом объеме испытания и исследования. Создание специальных моделирующих стендов и макетов на ранней стадии разработки программы позволяет решать возникающие задачи и вносить необходимые изменения заблаговременно.

Взаимодействие между космонавтами и КЛА часто называют взаимодействием «человек — машина». Необходимо проверить правильность проектирования отсека для экипажа с учетом требований эргономики и инженерной психологии, а также решить проблему оптимального распределения функций между экипажем и автоматикой. И в этом случае вопросы взаимодействия лучше всего решать путем изготовления макета на ранней стадии проектирования и отработки.

К этому же типу взаимодействия могут быть отнесены действия операторов, управляющих автоматизированной системой управления пуском комплекса, а также обеспечивающих управление ЛА из центра управления полетом с помощью наземных устройств командно-измерительного комплекса.

Физические явления, с которыми сопряжено функционирование РКК, настолько сложны, что не могут быть полностью изучены при теоретическом рассмотрении. Однако в процессе проведения теоретических работ создается математическая модель комплекса, выявляются основные вопросы, которые должны быть решены при экспериментальной отработке КЛА, формируется наиболее рациональный план организации экспериментальных исследований, а также разрабатываются принципы интерпретации и анализа результатов, полученных в этих исследованиях.

Рассмотрим некоторые основные особенности сложных технических систем, которые влияют на программу экспериментальной отработки.

Например, в работе [28] утверждается, что «главный признак системы — ориентация всех ее элементов на решение единой целевой задачи. Систему, таким образом, следует определить как организованный комплекс средств достижения общей цели».

С другой стороны, в работе [58] говорится, что «связи объединяют систему в единое целое. По существу, только наличие многих видов связей (причинных, логических, случайных и т.д.) делает понятие системы полезным».

Однако следует разделить возможные связи в системах на два класса: 1) обычные связи — соединения для передачи воздействий (механических, электрических, электромагнитных), связи «человек — машина»; 2) функционально-целевые связи — взаимодействия подсистем по фактическим состояниям и параметрам их работы в составе большой системы для достижения цели, поставленной перед всей большой системой.

Следует отметить, что функционально-целевые связи — взаимодействия подсистем — это, собственно, единственный тип связи, характерный для сложной системы, а остальные связи есть как в сложной системе, так и в простых подсистемах и узлах.

Функционально-целевые связи — это взаимодействия на основе анализа информации о выходных характеристиках подсистем, влияющих на целевую функцию комплекса. Например, неточность (погрешность настройки) в работе современной двигательной установки требует введения новых систем регулирования кажущейся скорости и системы одновременного опорожнения баков (СОБ), действующих в полете ЛА для достижения целей комплекса.

Приведем еще несколько примеров функционально-целевых связей. Неточность управления угловой стабилизацией движения на траектории ЛА требует введения систем боковой и нормальной стабилизации центра масс. Недостаточная надежность подсистем требует избыточности и резервирования. Для обеспечения высокой надежности экипажа вводится система аварийного спасения экипажа (САС). Для обеспечения достижения заданной цели вводятся системы коррекции траектории ЛА.

Выявление этого типа взаимосвязей позволило коллективу под руководством С.П. Королева в 50-х годах первому создать РКК, а также сформулировать и решить практические задачи, которые легли в основу новой науки — системотехники, обобщившей поставленные проблемы и создавшей новый, системный, комплексный подход к проектированию и созданию сложных технических систем всех типов.

Интересно проследить последовательность внедрения системных принципов в ракетной технике. Сначала были простые системы. Истори-

чески первой была ракета пороховая (твердотопливная), она имела определенное количество топлива, ее полет продолжался до тех пор, пока не выгорало все топливо. Потом стали появляться ракеты на жидком топливе, они имели баки, магистрали, сопла и т.д., но еще не представляли собой сложную техническую систему.

Потом была введена дополнительная система — часы. ЖРД стал выключаться в назначенное время, что несколько уменьшило неопределенность траектории полета, рассеивание по высоте при вертикальном пуске и рассеивание по дальности при пуске под углом к горизонту.

Существенным этапом внедрения системного принципа было введение дополнительной системы управления по скорости, когда стали измерять фактическую скорость полета и выдавать команду по достижении заданной скорости — ввели выключение двигателя по интегралу продольных ускорений. Далее точность полета была повышена с учетом отклонений центра масс ЛА.

В последующем были существенно улучшены выходные характеристики двигателей в полете ЛА при постановке систем РКС и СОБ, что уже было отмечено выше.

Таким образом, системный подход позволил усилить целеустремленность комплекса и существенно улучшить выходные характеристики подсистем, подчинив их требованию достижения цели комплекса, причем для этого в комплекс вводились дополнительные подсистемы. Повышение сложности и стоимости вновь создаваемых комплексов требует оптимизации и повышения надежности методов экспериментальной отработки. Все больше на планы экспериментальной отработки влияет усиление взаимосвязей между подсистемами: увеличивается роль комплексной отработки взаимосвязанных подсистем. Наиболее характерно для методов экспериментальной отработки ЛА дальнейшее повышение значимости и увеличение объема всех видов наземных испытаний. При этом используется уникальное дорогостоящее оборудование, с помощью которого условия эксперимента в достаточной степени приближаются к натурным, летным.

1.1.2.

Системный принцип в планировании экспериментальной отработки ЛА

На начальном этапе развития ракетно-космической техники основная экспериментальная отработка ЛА происходила при летно-конструкторских испытаниях (ЛКИ), составляющие системы (компоненты) обрабатывались только автономно. При этом для отработки и доводки ЛА требовалось не менее 50 — 100 пусков ЛА. По

мере усложнения ЛА, в особенности с переходом на многоступенчатые конструкции, резко повысилась стоимость самого ЛА и проведения каждого его пуска, в связи с чем изменилась стратегия проектирования экспериментальной отработки ЛА, которая сейчас ориентируется на 2 — 3 пуска при ЛКИ.

Рассмотрим основные задачи, которые необходимо решать для достижения поставленной цели испытаний сложной технической системы.

По определению, приведенному в БСЭ (изд. 3, 1978 г.), «испытание машин — экспериментальное определение конструктивных и эксплуатационных свойств машин для выявления их соответствия техническим требованиям или опытного изучения реальных процессов, происходящих в машинах».

Испытать какой-либо объект — это значит создать для него такие условия, чтобы обнаружили его реальные особенности.

Испытания могут служить разным целям.

На начальном этапе в результате испытаний узнают, реализуема ли та или иная схема, совместимы ли и могут ли быть использованы в комплексе отработанные автономно системы, подсистемы, агрегаты, элементы.

При дальнейшем развитии схемы возникает вопрос о том, какой вариант является оптимальным в смысле эффективности, надежности, стоимости, поведении при различных возмущениях и т.д.

Далее начинается этап испытаний различных качеств, целью которого является проверка системы (комплекса) на выполнение определенных требований по эффективности и надежности. При анализе результатов испытаний ставится задача получения достоверных значений основных характеристик ЛА, которые можно разделить на три обобщенные группы: энергетические характеристики, точность и надежность.

Энергетические характеристики определяются суммарным импульсом силовых установок, необходимым для сообщения полезному грузу скорости движения, требуемой для выведения КЛА на заданную орбиту, и для осуществления ориентации, коррекций, разгона, торможения и т.д.

Точность движения аппарата в основном определяется точностью выведения его к концу активного участка на баллистический, орбитальный участок траектории либо точностью введения в коридор входа при посадке на планету, т.е. степенью соответствия вектора скорости и координат заданным значениям. Точность выведения КЛА должна быть исключительно высокой. В ряде случаев при малейшем нарушении требований по точности настолько искажается траектория свободного полета КЛА, что он не может достигнуть заданного района и выполнить свою основную задачу.

Характеристики надежности ЛА, имеющего большое количество силовых установок, сложных агрегатов и механизмов, автоматиче-

ски действующих элементов (например, ракета «Атлас» имеет свыше 300 тыс. точных деталей, комплекс «Сатурн» — «Аполлон» — более миллиона узлов), являются исключительно важными, но добиться их удовлетворительных значений в реальных условиях эксплуатации очень трудно.

На ранних этапах экспериментальной отработки надежность современных комплексов КЛА и их отдельных систем очень невелика. Вследствие этого, чем сложнее комплекс КЛА, тем большую роль будут играть его экспериментальная отработка, методы организации испытаний и анализа их результатов.

Обеспечение надежности пилотируемых КЛА является еще более трудной задачей. Так, например, при достаточно высокой вероятности выполнения задачи полета (порядка 0,95 — 0,96) вероятность безопасности экипажа, т.е. возвращения экипажа на Землю без потерь, должна быть не менее 0,999. Столь высокая надежность не может быть проверена только вероятностными статистическими методами. Поэтому в программу надежности вводится ряд качественных показателей, и при определении надежности пользуются совокупностью количественных, в том числе вероятностных, и качественных методов.

Всюду, где это возможно, для увеличения вероятности безопасности и выполнения задачи полета применяется резервирование. Все системы, за исключением корпуса, тепловой защиты и некоторых частей главного двигателя, резервируются, а в случае многодвигательной схемы резервируется и двигатель в целом. Правила требуют прекращения экспедиции в ситуации, когда еще один отказ в критическом узле приведет к гибели экипажа. Поэтому функциональные элементы всех систем должны иметь двойное резервирование для безопасности экипажа и тройное, если полет должен продолжаться после одного отказа.

Так как большинство отказов некритичны по времени, принят метод непрерывного контроля экипажем бортовых индикаторов и контроль наземными станциями телеметрических данных для обнаружения отказа и выбора корректирующих действий.

Для повышения гарантии безопасности экипажа на активном участке полета создана специальная система аварийного спасения экипажа в случае аварии ракеты-носителя.

Поскольку подтвердить статистическую величину надежности КЛА как простую сумму надежностей множества элементов (подсистем) невозможно, то следует надежность сложной системы рассматривать в соответствии со следующей моделью :

* Справочник по надежности. Т. 2/ Под ред. Б.Е. Бердичевского. — М.: Мир, 1970.

$$P = P_{\text{кон}} P_{\text{Эк. усл}} P_{\text{техн. проц}}$$

где P — надежность системы; $P_{\text{кон}}$ — надежность, потенциально свойственная конструкции при выбранной структуре и степени резервирования; $P_{\text{Эк. усл}}$ — надежность элемента в эксплуатационных условиях; $P_{\text{техн. проц}}$ — надежность технологических процессов, вероятность того, что элементарные процессы, применяемые при производстве комплекса (подсистемы, аппаратуры), завершаются, не вызывая недопустимых дефектов.

Программа испытаний построена исходя из того, что успехи космических исследований позволили определить внешние условия, в которых будет проходить полет КЛА, и поэтому наземные испытания с имитацией условий внешней среды могут установить пригодность КЛА и его систем для выполнения поставленной задачи. В этом случае отказы при летных испытаниях могут произойти только вследствие непредусмотренного сочетания внешних условий (чего не должно быть) или отказа отдельных устройств. Строгость и полнота программы наземных испытаний являются поэтому основными факторами предупреждения отказов в полете.

Программа испытаний предусматривает анализ любого отказа на любом уровне испытаний, определение его причины и внесение соответствующих изменений в конструкцию или в эксплуатационную документацию.

Надежность комплекса ЛА обеспечивается в процессе экспериментальной отработки при наземных и летных испытаниях.

Программа наземных испытаний обычно делится на два основных этапа: — исследовательские испытания, в состав которых входят конструкторские, отработочные, доводочные (квалификационные) испытания; — контрольно-технологические (приемочные) испытания.

Цель исследовательских испытаний — определение возможности создания конструкции и обеспечение способности разрабатываемой конструкции выполнять требуемые функции в течение заданного времени в диапазоне внешних условий, которые могут иметь место при наземной подготовке комплекса и в полете.

Объектами исследовательских испытаний являются макет опытного образца, опытный образец и промышленный образец.

Цель контрольно-технологических (приемочных) испытаний — проверка серийных изделий, соответствующих по конструкции изделиям, прошедшим квалификационные испытания, на отсутствие производственных дефектов. Программа этих испытаний включает функциональные испытания и испытания отдельных изделий на воздействие эксплуатационных условий перед их монтажом, а также комплексные испытания систем и подсистем после монтажа.

Значение каждого этапа испытаний можно оценить на примере

экспериментальной отработки КК «Аполлон»: 67,5% всех конструктивных недостатков было обнаружено при исследовательских (квалификационных) испытаниях; 30% конструктивных недостатков выявили контрольно-технологические (приемочные) испытания; всего 2,5% недостатков выявили предстартовые и летные испытания.

Кроме того, квалификационные испытания выявили 45,3% производственных дефектов, контрольно-технологические — 53,7%, а предстартовые и летные испытания — 1%.

Усложнение комплексов ЛА наложило новые, жесткие требования на информационно-измерительную систему.

Во-первых, возрос потребный объем информации. Так, например, межконтинентальная баллистическая ракета (МБР) типа «Юпитер» имела объем информации порядка 100 параметров, РКК типа «Восход», «Восток» — на порядок больше (1000 параметров), а мощные ракеты-носители типа «Сатурн» с КК «Аполлон» и система типа «Энергия» — «Буран» — еще на порядок больше.

Во-вторых, изменились методы использования и обработки информации при проведении предстартовых испытаний и в полете. Например, при предстартовых испытаниях перестали использоваться отдельные измерительные системы, входящие в испытательные пульты. В этих операциях используется единая дистанционная измерительно-информационная система. Различного рода испытательные пульты заменены счетно-вычислительными машинами, как наземными, так и бортовыми, и все проверки алгоритмизируются и программируются, а программы вводятся в ЭЦВМ.

В-третьих, существенно увеличился радиус действия информационно-измерительных и командных систем по управлению КА: большой комплекс операций выполняется в районе Луны, Марса, Венеры и др.

Анализ результатов испытаний КЛА может быть подчинен одной из двух возможных задач:

— определение состояния КЛА в ходе выполнения полета и прогнозирование его характеристик для принятия оптимальных решений по выполнению полной задачи пуска или прекращению полета — решение типа «да» — «нет» для целей управления полетом;

— получение наиболее полных характеристик КЛА по результатам закончившихся испытаний.

Обычно эти задачи взаимосвязаны.

Конечным результатом анализа должно быть получение достоверных опытных данных путем математической обработки информации. Это получение математического ожидания (средних), дисперсии, доверительных интервалов, общей точности, выделение истинных значений путем фильтрации зашумленных сигналов, пересчет параметров функций по косвенным измерениям составляющих (аргументов), сравнение опытных и расчетных (проектных) данных и т.д.

Однако в реальных условиях, особенно при первых пусках КЛА, ситуации могут быть достаточно сложными. Например, возможен случай потери информации, либо полной с какого-то времени, либо частичной. Возможны также выходы из строя отдельных узлов, агрегатов, систем и, наконец, аварийная ситуация в полете. В последнем случае анализ результатов испытаний особенно необходим, так как обнаружены критические ситуации, для выявления которых, по существу, и проводятся испытания.

При таких усложнениях приходится использовать аппарат теории исследования операций, технической диагностики, прогнозирования и другие методы системного анализа, чтобы выбрать оптимальную стратегию выявления первопричины аварии и разработать рекомендации по усовершенствованию выявленной критичной системы.

Экспериментальная натурная и летная отработка комплекса ЛА является завершающей частью работ по проектированию и созданию ЛА.

1.2. Цели, задачи и общие методы экспериментальной отработки ЛА

Целью экспериментальной отработки ЛА является создание образца, полностью удовлетворяющего требованиям технического задания на весь комплекс ЛА, комплектующих его блоков и агрегатов, наземного оборудования, систем обеспечения и управления пуском в эксплуатационных условиях подготовки и проведения пуска и обеспечения всех участков полета.

Экспериментальная отработка ЛА охватывает следующие направления работ:

1) наземные испытания отдельных частей ЛА или ЛА в целом в условиях, максимально имитирующих натурные условия эксплуатации, исследование параметров и условий работы систем и агрегатов ЛА;

2) экспериментальное определение летно-технических характеристик ЛА в ходе летных испытаний;

3) доводочные работы по изменению конструкции ЛА и режимов его работы, выполняемые на основании анализа результатов указанных выше экспериментальных исследований.

Общие задачи экспериментальной обработки ЛА могут быть следующие:

1. Оценить правильность основных конструктивных и схемных решений, положенных в основу проекта ЛА, откорректировать их в процессе отработки.

2. Проверить и отработать функционирование агрегатов ЛА, отдельных конструктивных узлов и приборов в эксплуатационных условиях и отработать их взаимодействие в общей конструктивной схеме.

3. Определить летно-технические характеристики ЛА в полном диапазоне условий его применения.

4. Исследовать и в процессе отработки устранить причины всех возможных неисправностей, которые могут привести к отказу или аварии при подготовке и пуске комплекса ЛА, к аварии космического аппарата или головного блока с полезной нагрузкой при полете с ракетой-носителем на активном участке траектории.

5. Исследовать и в процессе отработки устранить причины неисправностей, которые могут привести к нарушению нормального полета ЛА на орбитальном участке траектории.

6. Отработать технологию эксплуатации ЛА.

7. Довести отработку до такого состояния, при котором предстартовая подготовка ЛА, проведенная в соответствии с эксплуатационной документацией, целиком определяет режим его полета, гарантирует выведение ЛА на заданную орбиту, безопасность экипажа, выполнение задачи полета и возвращение ЛА.

Экспериментальная отработка, являясь естественным продолжением проектирования аппарата, завершает создание комплекса ЛА. Однако она не только является конечным звеном, но и самым тесным образом переплетается с этапами проектирования.

При проектировании каждого ЛА учитываются не только теоретические предпосылки, но также и опыт создания других ЛА, опыт их отработки, результаты проведенных при этом исследований. Однако этих материалов оказывается недостаточно, особенно при проектировании новых аппаратов, существенно отличающихся от предшествующих. К новому аппарату предъявляются и новые требования, выполнение которых далеко не всегда возможно с помощью известных, хорошо отработанных конструктивных и схемных решений.

Возникает необходимость в применении новых материалов и конструкций, принципиально новых систем, которые к моменту времени проектирования (создания) ЛА практикой не проверены и без этого не могут считаться достаточно надежными.

Экспериментальную отработку всех этих конструктивных новшеств необходимо проводить одновременно с разработкой эскизного проекта аппарата, а в ряде случаев — со значительным опережением, так как часто именно недостаток необходимых экспериментальных данных более всего тормозит проектирование.

Невозможно сначала спроектировать аппарат в окончательном ва-

рианте, затем его изготовить, а после этого приступить к экспериментальной отработке. Конструкция ЛА получается только как результат отработки нескольких модификаций экспериментального варианта.

Очевидно, что задачи экспериментальной отработки аппарата могут быть в полной мере решены лишь в том случае, когда она завершается испытаниями аппарата, в наименьшей степени отличающегося от штатного образца, в натуральных условиях, т.е. летными испытаниями.

Однако летные испытания могут быть по существу проверкой результатов экспериментальной отработки, выполненной ранее, при испытаниях опытных аппаратов, в той или иной степени отличающихся от создаваемого аппарата в его окончательном виде.

После формулирования общей цели экспериментальной отработки необходимо установить строгую последовательность ее проведения. Так, например, проверка точности выведения КЛА попросту невозможна, пока окончательно не установлена общая конструктивная схема аппарата и не отработаны двигательная установка и другие системы. Этапы экспериментальной отработки определяются при ее проектировании.

Первая задача проектирования экспериментальной отработки — распределение подлежащих решению проблем по этапам.

Вторая задача — назначение и обоснование требований к основным средствам отработки: заводским испытательным стендам, автономным и комплексным огневым стендам, испытательным полигонам и применяемой при испытаниях специальной измерительной аппаратуре.

Третья задача — проработка и назначение требований к конструкции, оснащению и летным характеристикам экспериментальных образцов, проходящих испытания на каждом из этапов, в том числе макетов, летающих моделей и т.п.

Четвертая задача — разработка методики решения отдельных экспериментально-исследовательских задач, связанных с анализом взаимодействия РН и наземных пусковых устройств, с контролем работы ДУ, с определением действительных характеристик автомата стабилизации и системы стабилизации центра масс в полетных условиях, с исследованием стабилизации головного блока при полетах его в плотных слоях атмосферы, с исследованием импульса последствия, с проверкой условий жизнеобеспечения пилотируемого ЛА, условий возвращения и посадки ЛА и т.п. Сюда же относится предварительное определение требуемого числа аппаратов на каждом этапе испытаний.

Пятая задача — проектирование системы измерений, обеспечивающей при стендовых и летных испытаниях на каждом этапе решение всех оговоренных программами вопросов.

Шестая задача — проектирование организации огневым стендовых и летных испытаний аппарата.

Каждому этапу проектирования ЛА соответствует определенный этап экспериментальной отработки (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Схема проектирования ЛА и его экспериментальной отработки

Проектирование экспериментальной отработки ЛА должно проводиться прежде всего исходя из типа ЛА: характера стоящих перед ним задач, новизны и сложности его конструкции. Как и в каждой технической задаче, решение сводится к поиску оптимального варианта. Значит, надо определить критерии оптимальности. Основными критериями оптимальности принимаются: стоимость, сроки, надежность.

Понятие стоимости как критерия оптимальности должно включать в себя полную стоимость всех работ, связанных с проведением эксперимента на всех этапах.

При этом в стоимость программы экспериментальных работ должны включаться все расходы:

$$C_{\text{полн}} = \sum_1^n C_{\text{обр}} + \sum_1^n C_{\text{исп. обор}} + \sum_1^n C_{\text{упр. инф}} + \\ + \sum_1^n C_{\text{мет}} + \sum_1^n C_{\text{тран}} + \sum_1^n C_{\text{исп}},$$

где $C_{\text{полн}}$ — полная стоимость всей программы экспериментальной отработки ЛА; $\sum_1^n C_{\text{обр}}$ — полная суммарная стоимость всех необходимых опытных образцов на каждом этапе испытаний в количестве, предусмотренном программой; $\sum_1^n C_{\text{исп. обор}}$, $\sum_1^n C_{\text{упр. инф}}$, $\sum_1^n C_{\text{мет}}$, $\sum_1^n C_{\text{тран}}$, $\sum_1^n C_{\text{исп}}$ — суммарная стоимость работ, затраченных на всех этапах испытаний соответственно на создание, изготовление и освоение испытательного оборудования, на создание командно-управляющих и информационных систем, на создание методов и методик испытаний, на транспортировку объектов испытаний, на непосредственное проведение испытательных работ на всех этапах испытаний; n — число уровней (этапов) испытаний, от самого низшего — испытания материала или элемента, применяемого в сложной технической системе, до высшего — натуральных испытаний полностью укомплектованной сложной системы.

Понятие сроков создания системы как критерия оптимальности программы обозначает общий цикл экспериментальных работ. Сокращение его возможно при параллельности ведения работы с планированием по сетевому графику.

Понятие надежности как критерия оптимальности программы экспериментальной отработки включает в себя достаточно широкие требования. Это прежде всего обеспечение заданной безотказности всей

системы в условиях эксплуатации и в некоторых нештатных ситуациях. Это также необходимая достоверность и точность экспериментально-го получения основных параметров систем, подтверждающих обеспечение достижения цели, поставленной перед создаваемой сложной технической системой. Следует иметь в виду, что высокие темпы технического усложнения конструкции и комплекса бортовых систем и систем обеспечения пуска и полета ЛА сохраняются и в будущем.

Экспериментальная отработка ЛА проводится в определенной последовательности (рис. 1.3).

Начинаются работы с изучения проектируемого ЛА как объекта испытаний (блок 000), представляющего собой сложную техническую систему с выраженными особенностями. В первую очередь, это новизна объекта, взаимовлияние составляющих подсистем (компонентов) и целостность объекта, требования к его надежности и др. Далее на основе выявленных особенностей объекта испытаний производится планирование эксперимента (блок 001). Общеизвестно, что сложную техническую систему экспериментально отработать за один этап испытаний невозможно, поэтому обосновываются необходимые этапы (уровни) испытаний, определяются цели, задачи, объем испытаний (виды, типы и количество макетов и опытных образцов) для каждого этапа (блок 001).

На основе планов экспериментов вырабатываются требования к испытательным базам, стендам и системам информации и автоматизированного управления испытаниями (блок 010). Следующим звеном является проектирование, составление ТЗ, курирование и освоение испытательных баз, стендов и систем автоматизированного управления испытаниями (блок 011).

После освоения испытательных средств экспериментатор проводит необходимые наземные испытания основных блоков и ЛА в целом: механические, электрические, тепловые, огневые, вакуумные и т.д. (блок 012).

После этих операций возможен переход к проведению натуральных, предстартовых и летных испытаний комплекса ЛА (блок 002).

Затем проводится автоматизированная и метрологическая обработка информации (блок 003).

На следующем этапе результаты испытаний сопоставляются с характеристиками, полученными при проектных расчетах, и обобщаются. Вырабатываются рекомендации по устранению недостатков. В необходимых случаях проводится техническая диагностика выявленных в ходе испытаний на любом уровне отказов и неисправностей (блок 004).

Заключительным этапом экспериментальных работ является принятие решения о подтверждении основных технических характеристик объекта испытаний и о прекращении испытаний (блок 005).

Параллельно с работами, обозначенными в правой ветви схемы (блоки 010, 011, 012), проводятся работы, обозначенные в левой ветви (блоки 020, 021, 022, 023).



Рис. 1.3. Последовательность проведения работ по экспериментальной обработке ЛА

1.3. Комплексная экспериментальная отработка ЛА

При проектировании экспериментальной отработки необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

- максимально использовать имеющийся опыт, соблюдать необходимую последовательность работ;
- отрабатывать элементы, узлы, системы, агрегаты, блоки на самых низших уровнях (этапах) иерархии испытаний.

На этих принципах основаны следующие рекомендации:

1. Отработка новых конструкций и систем должна производиться, по возможности, на наземных стендах, имитирующих условия полета, и на ранее созданных ЛА, комплексных РКС.

2. Следует максимально использовать отработанные ранее агрегаты, системы, блоки и т.д.

3. Работы должны вестись параллельно по всем системам, блокам и, по возможности, операциям работы РКС, с планированием по сетевому графику, что дает сокращение общего цикла работ.

Отработанные на подэтапах конструкции, блоки, агрегаты и новые системы могут идти самостоятельно в эксплуатацию так же, как унифицированные составляющие, входящие в различные РКС.

4. Поскольку летные испытания комплекса ЛА — высший уровень иерархии экспериментальной отработки, они проводятся не для отработки систем, блоков, агрегатов, а для проверки правильности условий проведения отработки на более низких уровнях иерархии испытаний (уровень блоков, макетов) и для выполнения прямой задачи (или части ее), поставленной перед ЛА по техническому заданию.

Указанные выше рекомендации неоднократно реализовывались при создании отечественных ЛА.

Перед созданием многоступенчатой ракеты-носителя типа «Восход» необходимые для ее существования системы: регулирования кажущейся скорости, одновременного опорожнения баков (СОБ), радиоуправления и телеметрии и др. — отрабатывались на ранее отработанной одноступенчатой ракете.

После создания и осуществления полета первого спутника для обеспечения полета первого человека в космос была модифицирована ракета-носитель с добавлением блока 3-й ступени; на пилотируемом корабле были использованы конструктивные принципы и системы, отработанные на спутниках с животными, манекенами, на лунниках, такие, как система ориентации, коррекции траектории, системы приземления, торможения и др.

Аналогичные принципы проведения экспериментальной отработки также использовались в практике разработки ЛА зарубежными специалистами.

На основании принятых критериев оптимальности программы экспериментальной отработки, а также обобщения приведенных выше принципов и опыта выполнения программ экспериментальной отработки ЛА можно представить структуру экспериментальной отработки ЛА как многоуровневую, иерархическую, адаптивную, с обратной связью и возможностью возвращения на любой низший уровень отработки. Количество уровней схемы зависит от степени сложности системы и новизны создаваемого комплекса.

Структурную схему экспериментальной отработки комплекса ЛА можно представить в виде семи иерархических уровней (рис. 1.4).

Уровень I. Контроль исходных материалов и элементов на стабильность физических, химических, технологических и других свойств и подтверждение возможности их применения для узлов и агрегатов в соответствии с ТЗ на создаваемые системы.

Необходимость контроля качества материалов, особенно новых, вновь разрабатываемых специально для создаваемой системы, возникает при проверке их соответствия техническим, паспортным данным еще до запуска их в производство. Затем этот контроль необходим в процессе производства, если обнаруживаются какие-либо отклонения в предусмотренных технологических режимах их обработки или если изготовляемые из них детали не отвечают предъявляемым требованиям. Чрезвычайно важным является контроль материалов на выполнение требований, формулируемых по результатам испытаний изделий на каждом этапе, когда проводится анализ причин отказов или отклонений тех или других характеристик работоспособности. При этом в ряде случаев могут уточняться ТЗ на материалы, если даже при маловероятных отклонениях условий испытаний или эксплуатации из-за этих материалов нештатная обстановка может превратиться в аварийную, катастрофическую. Так, например, при испытаниях космического корабля «Аполлон-VIII» при коротком замыкании в электросистеме возник пожар с выделением при сгорании пластмассовых деталей ядовитых газов, что привело к гибели астронавтов.

Уровень II. Экспериментальная отработка и контрольно-доводочные испытания отдельных узлов, приборов, агрегатов, связей на выполнение проектных, конструктивных функций и стабильность их качеств в соответствии с ТЗ в условиях, подобных рабочим (или заданным худшим, предельным) условиям (силовые нагрузки, перегрузки, вибрации, температуры, вакуум, электрические нагрузки, наводки и пр. с учетом переходных процессов включения, выключения систем, циклы снятия нагрузок и т.д.).

Уровень III. Экспериментальная отработка и доводочные испытания систем в целом на выполнение проектных функций в соответствии

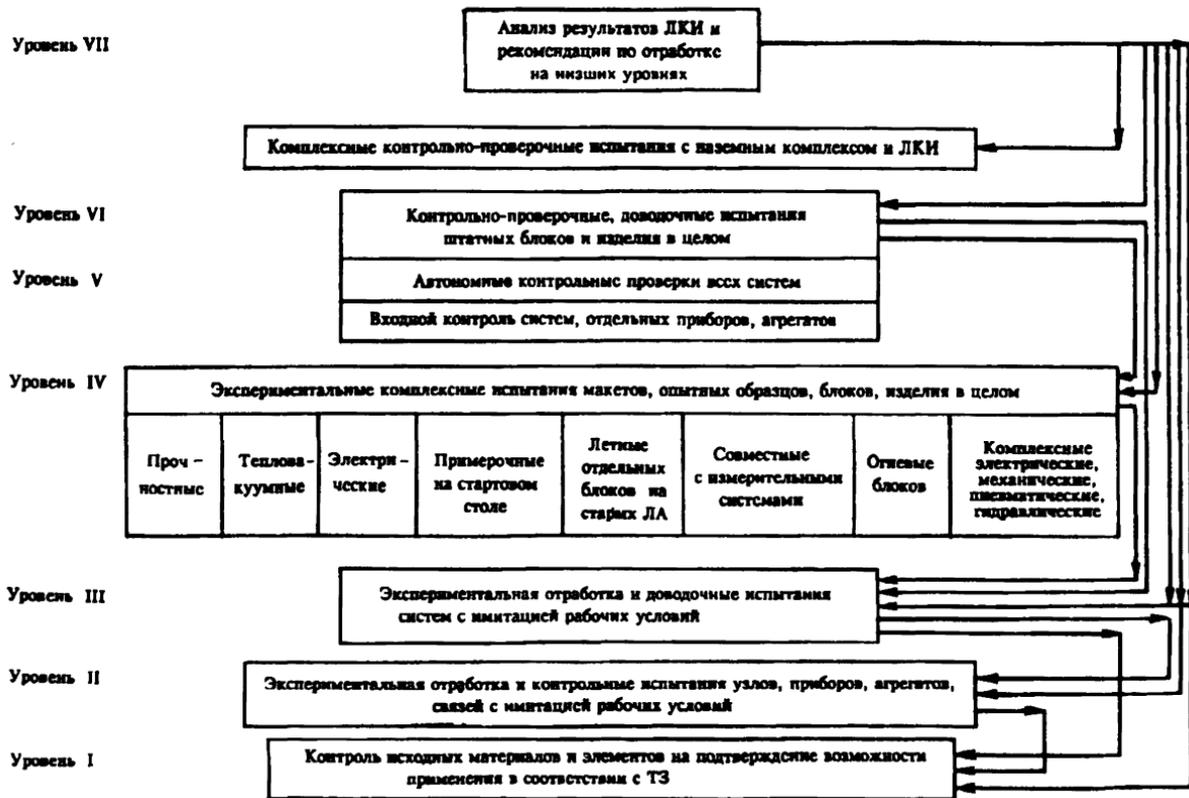


Рис. 1.4. Структурная схема экспериментальной отработки большой сложной системы типа комплекса ЛА

с ТЗ в рабочих условиях или в условиях, имитирующих рабочие условия на изделии. Связи в системах (и между системами) должны быть отработаны так же, как элементы (см. уровень II).

На этом уровне также выявляются возможные нештатные ситуации в системе при отказе отдельных элементов или узлов.

Испытания уровня III могут быть очень разнообразны и многочисленны — это, по существу, основные отработочные и приемосдаточные, автономные испытания составляющих систем (подсистем) перед постановкой их на ЛА. Здесь и моделирование систем на ЭВМ, и продувка моделей в аэродинамических и газодинамических трубах, и отработка теплозащиты на газодинамические нагрузки, холодные проливки систем и магистралей ДУ, прочностные испытания конструктивных элементов, электрические испытания, климатические испытания, испытания на старение, испытания систем разделения, открытия солнечных батарей, герметичных шлюзов, ленточных антенн и т.д.

На этом уровне также проводятся испытания на надежность, выявляются возможные нештатные ситуации в системе при отказе отдельных элементов или узлов. Выявляются зависимости изменения характеристик системы (как выходных параметров, так и обеспечивающих надежность функционирования) от возможных вариаций эксплуатационных условий, предварительно установленных в ТЗ на систему. Определяется вероятность и критичность отказов. Пересматриваются заданные запасы надежности, степени резервирования системы.

Уровень IV. Экспериментальная комплексная отработка макетов, опытных образцов, отдельных блоков, ЛА в целом, в том числе по уточнению условий ТЗ, действительных натуральных условий, с учетом новизны опытных работ; по контролю конструктивного и технологического выполнения и совместимости систем.

Комплексная отработка на этом уровне разделена на следующие направления:

- а) прочностные испытания, статические и динамические (вибрации) при нагружениях;
- б) испытания на работоспособность в условиях вакуума (в барокамерах);
- в) испытания на электрические нагружения;
- г) примерочные испытания на стартовом столе аппарата вместе с носителем и наземным оборудованием;
- д) экспериментальные летные испытания отдельных блоков или макетов на самолетах или других ранее отработанных ЛА;
- е) отработка измерительных систем совместно с основными (совместимость, допустимые уровни помех, точность);
- ж) огневые испытания; стендовые огневые испытания экспериментальных ступеней и огневые примерочные испытания летных ступеней;
- з) комплексные испытания электрических, механических, пневматических, гидравлических систем.

Следует отметить, что по существу только уровень IV испытаний является начальным, первым уровнем испытаний сложной технической системы в целом. Все предыдущие уровни испытаний были испытаниями только составляющих подсистем. Поэтому специалист-экспериментатор, испытатель сложных технических систем начинает свою работу только на уровне IV испытаний. На предыдущих уровнях испытаний основные работы проводят, как правило, специалисты-смежники, изготавливающие отдельные компоненты, подсистемы. Однако они должны руководствоваться основными положениями по проведению испытаний, соблюдать режимы нагружений, учитывая взаимовлияние стыкуемых систем, с уточнением их на более высоких уровнях экспериментальной отработки ЛА.

Уровень V. Контрольно-проверочные, доводочные, комплексные испытания штатных блоков и ЛА в целом:

а) входной контроль систем или отдельно поставляемых узлов, приборов, агрегатов;

б) контроль и доводка монтажно-сборочных работ. Прозвонка кабельной сети, проверка целостности изоляции электросхем;

в) наземный контроль всех электрических нагружений и точности показателей функционирования всех систем;

г) штатные контрольные проверки всех механических устройств на целостность и функционирование;

д) штатные контрольные комплексные проверки всех систем (силовых, автоматических, электрических, вспомогательных и др.) на их нормальное функционирование в целом и готовность.

Выявление относительно слабых мест систем, возможных причин нештатных, аварийных ситуаций, необходимости введения резервирующих элементов в системы при высокой критичности отказов и малых запасах надежности и определение путей выхода из нештатных ситуаций при малых вероятностях и малой критичности отказов.

Уровень VI. Подготовка и проведение летно-конструкторских испытаний (ЛКИ). Комплексные контрольно-проверочные, доводочные испытания ЛА в целом с наземным оборудованием: пусковым, стартовым, измерительным, управляющим. Высший уровень иерархии.

Уровень VII. Обработка и анализ результатов ЛКИ с возвратом на любой нижний уровень иерархии при выявлении недостатков и уточнение требований (условий) к отдельным системам, узлам и агрегатам.

В связи с тем, что принята адаптивная (приспосабливающаяся) система отработки, должна быть предусмотрена возможность возвращения на нижний уровень отработки с любого этапа, в виде обратной связи по мере накопления информации на высшем уровне.

Принятая иерархическая многоуровневая схема экспериментальной отработки позволяет выработать методы планирования объемов испытаний, основывающиеся на следующих положениях:

— чем выше иерархический уровень отработки, тем меньшее количество испытаний необходимо для обеспечения отработки, т.е. схема представляет собой пирамиду с широким основанием в виде уровня I, сходящуюся в вершину уровня VI, так как уровень VII, являясь самостоятельным, все же представляет собой как бы продолжение уровня VI иерархии;

— требования к экспериментальным образцам ЛА в целом или его блоков по количеству и степени отображения комплекса натурального (летного, штатного) изделия определяются возможностями задания и воспроизведения рабочих условий или отработки отдельных систем.

Указанные выше положения позволяют оптимизировать программу экспериментальной отработки. Они дают возможность создать физические и математические модели каждого этапа (уровня) испытаний, что позволяет выбрать математический аппарат для обработки результатов измерений, анализа результатов испытаний, поиска неисправностей, технической диагностики, прогнозирования. Исходя из требований к иерархическим уровням экспериментальной отработки, определяются объемы испытаний для каждого уровня. На нижних уровнях проводятся массовые испытания для выявления неоднородностей, микроструктурных дефектов и редко встречающихся производственных дефектов элементов, а на верхних уровнях — единичные испытания только для выявления часто встречающихся (систематических) конструктивных и производственных дефектов, которые могут возникнуть при сборке элементов в узлы и системы, а также для определения (уточнения) условий работы систем и узлов. Так, для программ высшего уровня иерархии ЛКИ носителей в США (типа «Сатурн-5») характерна тенденция сокращения числа пусков, которая достигла на настоящий момент, по-видимому, предела: 1 — 2 пуска.

1.4. Классификация испытаний

Учитывая специфику ЛА как сложной технической системы, попытаемся систематизировать виды его испытаний, пользуясь методологией, предусмотренной ГОСТ 16504-81 «Испытания и контроль качества продукции».

Основаниями для классификации испытаний могут служить следующие признаки.

1. Назначение испытаний. По этому признаку испытания делятся на следующие виды: исследовательские, контрольные, сравнительные и определительные.

Исследовательские испытания проводятся для изучения определенных характеристик свойств объекта. Исследовательские (научные) испытания необходимы для установления качественных и количественных соотношений характеристик для ранее неизвестных ситуаций, для сопоставления и построения новых гипотез и теорий. Исследовательские испытания проводятся с целью:

- определения структурной совместимости всех выбранных подсистем, составляющих сложную техническую систему и способствующих достижению единой цели, поставленной перед системой как объектом испытаний на высшем уровне и на каждом этапе испытаний;

- определения или оценок показателей качества функционирования испытуемого объекта в определенных условиях его применения;

- выбора наилучших режимов применения объекта или наилучших характеристик свойств объекта;

- сравнения множества вариантов реализации объекта при проектировании;

- отбора существенных факторов, влияющих на показатели качества функционирования объекта;

- выбора вида математической модели функционирования объекта.

Контрольные испытания проводятся для установления соответствия характеристик объекта заданным требованиям.

Сравнительные испытания проводятся для сравнения свойств аналогичных по характеристикам или одинаковых объектов в идентичных условиях.

Определительные испытания проводятся для определения значений характеристик с заданными значениями показателей точности и (или) достоверности.

2. Уровень объекта испытаний. По этому признаку испытания делятся на следующие виды: испытания материалов и элементов, испытания узлов, приборов, агрегатов, устройств, испытания подсистем — компонентов, составляющих сложную техническую систему, испытания блоков системы, испытания сложной системы (полного состава). Классификация испытаний по этому признаку относится к экспериментальной отработке сложной технической системы, и поэтому он отсутствует в ГОСТ 16504-81.

3. Определяемые характеристики объекта. По этому признаку испытания делятся на следующие виды: функциональные испытания, испытания на прочность, на устойчивость, испытания на надежность, безопасность, на транспортабельность, граничные испытания, технологические испытания.

4. Этапы разработки продукции. По этому признаку испытания делятся на следующие виды: доводочные, предварительные, приемочные.

Доводочные испытания — исследовательские испытания, проводимые при разработке продукции с целью оценки влияния изменений, вносимых в нее для достижения заданных значений показателей ее качества.

Предварительные испытания — контрольные испытания опытных образцов и (или) опытных партий продукции с целью определения возможности их предъявления на приемочные испытания.

Приемочные испытания — контрольные испытания опытных образцов, опытных партий, проводимые с целью решения вопроса о целесообразности постановки этой продукции на производство и (или) использования ее по назначению.

5. Вид воздействия. По этому признаку испытания делятся на следующие виды: механические, климатические, термические, радиационные, электромагнитные, электрические, магнитные, химические, биологические. При этом следует иметь в виду, что кроме однофакторных воздействий возможны и многофакторные, т.е. комбинация этих воздействий.

Перечисленные испытания проводят для проверки работоспособности и (или) сохранения внешнего вида изделий в пределах, установленного нормативно-технической документацией (НТД) в условиях воздействия и(или) после воздействия указанных факторов.

6. Продолжительность испытаний. По этому признаку испытания делятся на следующие виды: нормальные, ускоренные и сокращенные.

Нормальные испытания — испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в такой же интервал времени, как и предусмотренный в условиях эксплуатации.

Ускоренные испытания — испытания, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимой информации о характеристиках свойств объекта в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях.

Сокращенные испытания — испытания, проводимые по сокращенной программе.

Следует отметить, что ускоренные или сокращенные испытания в основном применяются для объектов низших уровней, например узла, отдельного прибора, а также в случаях однофакторных внешних воздействий. Для объектов испытаний высших уровней или при многофакторных воздействиях для применения этих видов испытаний необходимы специальные исследования подобию состояния испытываемого объекта.

7. Результат воздействия. По этому признаку испытания делятся на два вида: неразрушающие и разрушающие.

Неразрушающие испытания — испытания с применением неразрушающих воздействий и методов контроля.

Разрушающие испытания — испытания с применением разрушающих воздействий и методов контроля.

8. Уровень воздействий. По этому признаку испытания делятся на следующие виды: испытания со штатными воздействиями, испытания

с вероятными нештатными воздействиями, испытания с усиленными воздействиями.

Классификация по этому признаку особенно характерна для испытаний сложной технической системы. Нештатные усиленные нагружения могут возникать ввиду возможных случайных неблагоприятных сочетаний взаимодействий подсистем, составляющих сложную систему.

9. Условия и место проведения испытаний. По этому признаку испытания делятся на следующие виды: лабораторные, стендовые, полигонные, натурные, с использованием моделей, эксплуатационные.

Лабораторные испытания — испытания объекта, проводимые в лабораторных условиях. Очевидно, что применительно к сложной технической системе этим испытаниям можно подвергать только объекты низших уровней, такие, как материалы, элементы, узлы, приборы.

Стендовые испытания — испытания объекта, проводимые на испытательном оборудовании. Испытательное оборудование — средства испытаний, представляющие собой техническое устройство для воспроизведения условий испытаний.

Полигонные испытания — испытания объекта, проводимые на испытательном полигоне.

Натурные испытания — испытания объекта в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению, с непосредственным оцениванием или контролем определяемых характеристик свойств объекта.

Испытания с использованием моделей включают проведение расчетов на математических или физико-математических моделях объекта испытаний и (или) воздействий на него в сочетании с натурными испытаниями объекта и его составных частей. Данные натурных испытаний необходимы в качестве исходных данных для моделирования; они также используются для проверки правильности функционирования объекта испытаний (правильности стыковки составных частей объекта, способности объекта выполнять задачи, для решения которых он предназначен, и т.д.).

Эксплуатационные испытания — испытания объекта, проводимые при эксплуатации.

10. Категория испытаний. По этому признаку испытания делятся на следующие виды: государственные, межведомственные и ведомственные. В ГОСТ 16504-81 этот признак назван «уровнем проведения испытаний». Однако, на наш взгляд, термин «уровень» более уместно отнести к объекту испытаний как элементу сложной технической системы. Именно так он и используется в ГОСТ 16504-81 при обозначении признака 2.

Государственные испытания — испытания установленных важнейших видов продукции, проводимые головной организацией по государственным испытаниям, или приемочные испытания, проводимые государственной комиссией.

Межведомственные испытания — испытания продукции, проводимые комиссией из представителей нескольких заинтересованных ведомств, или приемочные испытания установленных видов продукции для приемки составных частей объекта, разрабатываемого совместно несколькими ведомствами.

Ведомственные испытания — испытания, проводимые комиссией из представителей заинтересованного ведомства.

Испытания готовой продукции делятся на следующие виды: квалификационные, предъявительские, приемосдаточные, периодические, инспекционные, типовые, аттестационные, сертификационные. Это различные контрольные испытания, которые определяются нормативами, учитывающими характер продукции (ГОСТ 16504-81).

Для сложного объекта проводятся следующие виды испытаний: автономные, комплексные, испытания с имитацией необратимых операций, испытания в штатных условиях и в нештатных условиях, в том числе в условиях аварийных ситуаций, отказов отдельных резервируемых систем и каналов.

Эти виды испытаний характерны только для сложного объекта, поэтому они не были включены в ГОСТ 16504-81.

Автономным испытаниям подвергаются отдельные компоненты (подсистемы), составляющие сложную систему. Автономные испытания подсистем проводятся как до их монтажа (сборки) в единую систему, так и после монтажа и проверки всех соединений в составе сложной системы.

Комплексные испытания могут проводиться как для группы непосредственно связанных подсистем, так и для всех подсистем в составе объекта испытаний. Цель этих испытаний — проверка нормального функционирования всех систем после проведения монтажно-сборочных работ.

Испытания с имитацией необратимых операций имеют целью проверку нормального функционирования всех управляющих командно-исполнительных органов, обеспечивающих данные операции. При этом не проводятся полностью сами операции, а получается информация о правильности функционирования только командно-исполнительных органов, что позволяет принять решение о готовности подсистемы и возможности перехода к натурным необратимым операциям при проведении пуска ЛА. Примером таких проверок могут служить операции заправки и предстартового наддува баков с жидкими компонентами топлива, операции открытия клапанов на подачу топлива, команды на зажигание и пуск двигателя, команды на разделение блоков и т.п.

Испытания в условиях нештатных аварийных ситуаций должны проводиться наряду с испытаниями в штатных условиях эксплуатации для проверки эффективности принятых мер по обеспечению безопасности всех работ.

Испытания резервируемых систем (подсистем) и каналов необходимо проводить по специальным программам, так как при проверке в штатных условиях все эти резервные системы не проверяются, а проверяется только основная схема.

1.5. Условия функционирования КЛА

Ракетно-космическая техника функционирует в условиях, коренным образом отличающихся от условий функционирования других видов техники. Это высокие скорости полета (до 20 — 25 М), высокая степень разрежения окружающей среды (до 10^{-11} — 10^{-14} Па), невесомость либо очень малые перегрузки, радиационная и метеорная опасность.

Анализ условий работы, например такого КЛА, как «Спейс Шаттл», показывает, что общее количество внешних факторов, действующих на различных этапах эксплуатации, очень велико (табл. 1.1).

Внешними воздействующими факторами называются явления или процессы, внешние по отношению к объекту или составным частям данного объекта.

Факторы окружающей среды могут быть подразделены на естественные и искусственные.

К естественным факторам можно отнести климатические условия, воздействия биологических факторов, а также специфические условия космического пространства.

Искусственные факторы возникают как результат функционирования ЛА и его систем. К искусственным факторам, воздействующим на работу КЛА, можно отнести его высокую температуру, вызванную работой двигателей и аэродинамическим нагревом, механические нагрузки, пневматические и электрические нагрузки, а также химические воздействия, например, топлива, масел, гидросмесей и т.д.

Атмосфера Земли представляет собой газообразную оболочку, состав которой зависит от расстояния до Земли. В табл. 1.2 представлено изменение основных параметров атмосферы Земли в зависимости от высоты. Атмосферное давление вблизи Земли может колебаться в пределах $\pm 7\%$, а при тропических бурях — в пределах $\pm 10\%$.

Сухая воздушная атмосфера содержит (по объему) 78% N_2 , 21% O_2 , 0,9% Ar , а также других газов в сумме 0,1%. Во влажном воздухе содержание водяного пара может достигать до 4%.

Температура для различных климатических зон Земли колеблется от -75 до $+50^{\circ}\text{C}$. Резкие колебания температуры приводят к периодически повторяющимся расширениям и сжатиям деталей конструкции ЛА, что может вызвать их разрушение или нарушение герметичности системы.

Начиная с 11 км температура воздуха в среднем составляет -56°C . С высоты 30 км температура повышается до максимума (примерно на 80°C на высоте 50 км), после чего температура снова начинает понижаться. С высоты 100 км происходит постепенное повышение температуры, что обусловлено солнечной радиацией и бомбардировкой верхних слоев атмосферы космическими частицами. Здесь температура сильно колеблется в течение суток. Установлено, что на высотах 250—300 км температура, а точнее, температурный молекулярно-кинетический эквивалент составляет 1000 — 2000°C . Однако вследствие сильного разрежения передача энергии от газа к КА оказывается совершенно ничтожной, и баланс между тепловой энергией, полученной от газа и потерянной аппаратом через радиацию (излучение), устанавливается при низкой температуре. Основную роль в этом случае играет подвод теплоты солнечной радиацией и от бортовых источников.

Влажность — один из наиболее опасных климатических факторов. Она ускоряет коррозию металлов, изменяет электрические характеристики диэлектриков, вызывает тепловой распад материалов и т.д.

Максимальная абсолютная влажность, являющаяся функцией температуры, изменяется на 7% при изменении температуры на 1°C .

Для большинства процессов относительную влажность качественно оценивают по следующей шкале:

- свыше 80% — очень влажно;
- свыше 70 — 80% — влажно;
- свыше 50 — 70% — нормально;
- свыше 30 — 50% — сухо;
- менее 30% — очень сухо.

При насыщении относительная влажность составляет 100%.

Водяная пленка на поверхности материала быстро загрязняется, вследствие чего увеличивается ее проводимость, а это вызывает появление токов утечки и, следовательно, короткие замыкания в электрических цепях.

Если температура окружающей среды падает ниже точки росы, при которой относительная влажность равна 100%, и содержащийся в воздухе водяной пар достигает состояния насыщения, то выпадают осадки в виде росы, снега, воды, инея, тумана. Количество осадков измеряют в миллиметрах. Осадкам в 1 мм соответствует $0,001 \text{ м}^3$ воды, распределенной на поверхности 1 м^2 .

Свежевыпавший снег занимает примерно десятикратный объем по сравнению с водой.

Т а б л и ц а 1.1

ВНЕШНИЕ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА КОНСТРУКЦИЮ КЛА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

№ п/п	Действующие факторы	Предстартовая подготовка	Старт	Выведение и разделение ступеней	Орбитальный полет	Вход в плотные слои атмосферы	Посадка
1	Атмосферное давление	+	+				+
2	Скоростной напор			+		+	
3	Нестационарные скачки давления			+			+
4	Аэродинамический нагрев			+		+	
5	Акустическое нагружение		+	+		+	
6	Вибрация		+	+		+	+
7	Ударные нагрузки		+	+			+
8	Химическое воздействие	+	+				
9	Влажность	+	+				+
10	Дождь, роса, туман	+	+				+
11	Снег, град	+	+				+
12	Песок, пыль	+	+				+
13	Вакуум, захлаживание				+		
14	Солнечная радиация				+		
15	Биологические воздействия	+					
16	Линейные ускорения			+		+	
17	Невесомость				+		
18	Ветровые нагрузки	+	+	+			
19	Электромагнитное излучение				+		
20	Метеоритные частицы				+		
21	Поток заряженных частиц				+		

Т а б л и ц а 1.2

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЫСОТЫ

Высота, км	Давление, Па	Плотность, г/см ²	Температура, К	Концентрация частиц, см ⁻³	Степень вакуума
Уровень моря	$1,33 \times 10^5$	$1,2 \times 10^{-3}$	288	$2,7 \times 10^{19}$	—
200	$8,5 \times 10^{-5}$	$3,0 \times 10^{-13}$	1200	$7,0 \times 10^9$	Высокий
300	$1,0 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-14}$	1500	$8,0 \times 10^3$	
500	$4,0 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-16}$	1600	$2,5 \times 10^7$	
1000	$4,0 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-18}$	1600	$1,5 \times 10^5$	Очень высокий
2000	$8,0 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-19}$	1800	$2,0 \times 10^4$	
3000	$5,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-19}$	2000	$1,0 \times 10^4$	
5000	$4,0 \times 10^{-20}$	$4,0 \times 10^{-20}$	3000	$4,0 \times 10^3$	
10 000	$2,5 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-20}$	15000	$1,0 \times 10^3$	Сверхвысокий
20 000	$1,0 \times 10^{-10}$	$2,0 \times 10^{-21}$	50000	$1,0 \times 10^2$	
30 000	$2,5 \times 10^{-11}$	$6,0 \times 10^{-22}$	1×10^5	10	
50 000	$1,5 \times 10^{-11}$	$2,5 \times 10^{-22}$	2×10^5	3-4	

Особенно сильное разрушающее воздействие могут оказывать морская вода и морской туман, ускоряющие коррозию вследствие содержания в ней солей хлора, магния и других элементов.

При эксплуатации ЛА необходимо учитывать влияние содержащихся в воздухе пыли, песка, дыма.

Пыль — смесь твердых частиц в воздухе. Естественная пыль состоит из космических и земных частиц. В атмосфере осажается 0,12 — 0,15 м пыли за 100 лет. Техническая пыль образуется при сжигании топлива, износе и обработке деталей. В высокоразвитых странах технической пыли осажается на два порядка больше, чем естественной.

Примеси в воздухе могут вызывать нарушение функционирования электрических элементов, изменять режимы теплообменных аппаратов, вызывать механические повреждения, усиливать коррозию и т.д.

Биологическое воздействие оказывают грибковые заболевания. Оптимальными условиями для развития грибковых заболеваний, в частности плесени, являются: влажность воздуха более 85%, температура 20 — 30°C и застой воздуха. Именно под действием плесени происходят наибольшие разрушения пластмасс, дерева, резины, кожи. Плесень образует на поверхности материала водную пленку, которая способствует его химическому разложению и потере важнейших свойств.

На надежность оборудования влияют насекомые — термиты. Определенную опасность для кабелей и проводов представляют грызуны (мыши и крысы).

Защиту от биологических факторов осуществляют химическим и конструктивным методами: заменой материалов, подверженных образованию плесени или съедобных для насекомых и грызунов, изменением внутреннего климата устройств, уменьшением влажности воздуха, созданием надежных защитных оболочек и т.п.

Условия эксплуатации КЛА в космическом пространстве характеризуются совокупностью воздействий, к которым относятся: высокий вакуум, невесомость, температура (чаще сверхнизкая), электромагнитные и корпускулярные излучения, наличие метеорных частиц, магнитных и гравитационных полей планет и звезд и т.д.

При изучении параметров космических условий выделяют три среды: межзвездную, межпланетную, атмосферу планет и их спутников.

Межзвездная среда состоит из межзвездного газа и мельчайших твердых частиц — пыли, заполняющей пространство между звездами в галактиках. Газ почти равномерно перемешан с пылью. Межзвездная среда вблизи Солнца переходит в межпланетную среду.

Межпланетная среда заполняет пространство между планетами Солнечной системы. Она состоит из расширяющегося вещества солнечной короны (примерно 90% составляют ионизированные атомы водорода и около 9% — атомы гелия), несущего увлекаемое веществом магнитное поле.

На расстоянии от поверхности Земли около 200 км длина свободного

пробега частиц газа становится равной нескольким десяткам метров. Часть молекул и атомов, двигаясь в экзосфере (на высоте около 500 км), может иметь скорость, превышающую вторую космическую, и беспрепятственно уходить за пределы атмосферы планеты. Это рассеяние газов в межпланетное пространство называется диссипацией. Большая доля диссипирующих газов приходится на водород и гелий. В результате активности Солнца и явления диссипации состав и химическое состояние газов существенно меняются (рис. 1.5,а). Так, на высотах более нескольких тысяч километров частицы газов полностью ионизированы.

Основные компоненты атмосферы Луны, масса которой примерно в 81 раз меньше массы Земли, имеют следующие концентрации: водород — $6,5 \cdot 10^4$, гелий — $4 \cdot 10^4$, неон — $8 \cdot 10^4$, аргон — от $1,1 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^3$. Изменение суммарной концентрации нейтральных частиц в атмосфере Луны приведено на рис. 1.5,б.

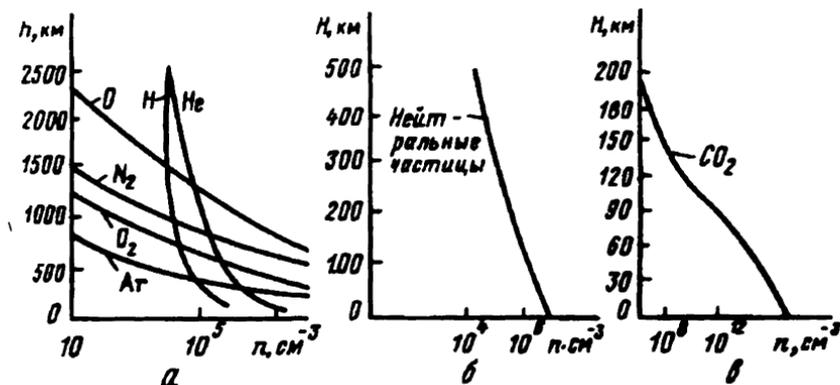


Рис. 1.5. Состав газов атмосферы: а — Земли; б — Луны; в — Марса

Меркурий, как и Луна, имеет весьма разреженную атмосферу. Значения давлений у поверхности Меркурия и Луны близки и составляют около $8 \cdot 10^{-8}$ Па.

Атмосфера Марса, масса которого только в 9 раз меньше массы Земли, менее разрежена по сравнению с атмосферами Луны и Меркурия. Давление газов у поверхности Марса примерно $6,55 \cdot 10^2$ Па. Изменение концентрации CO₂ — главного компонента атмосферы Марса, составляющего около 95%, представлено на рис. 1.5,в. На больших удалениях от поверхности CO₂ диссоциирует на СО и О.

Венера имеет чрезвычайно плотную атмосферу. Основной ком-

понент — CO_2 (примерно 97,4%). Давление у ее поверхности в 90 раз превышает давление у поверхности Земли. Температура вблизи поверхности достигает 500°C .

Юпитер — планета-гигант с очень большой массой. В атмосфере доминирует H_2 , затем следуют He , CH_4 , H_3 и т.д.

Сатурн имеет атмосферу, как полагают, близкую по составу к атмосфере Юпитера.

На Титане была обнаружена атмосфера, состоящая главным образом из азота с добавками аммиака, метана и других газов.

Плутон, вероятно, имеет атмосферу, состоящую из метана, в 300 раз менее плотную, чем атмосфера Земли.

На обращенную к Солнцу поверхность космического аппарата в окрестности Земли на 1 м^2 ежесекундно поступает около 1400 Дж энергии, переносимой солнечным электромагнитным излучением. Причем около 9% энергии в спектре излучения Солнца приходится на ультрафиолетовое излучение, 46,1% — на видимое излучение, 44,4% — на инфракрасное излучение; остальное — на рентгеновское и корпускулярное излучение. В инфракрасном и видимом диапазонах энергия отдельных квантов слишком мала, чтобы излучение могло оказывать физико-химическое воздействие на вещество. В то же время эти излучения нагревают элементы и материалы.

Земля, так же как и другие планеты, посылает на поверхность КЛА длинноволновое излучение (тепловой поток), которое обусловлено частичным отражением солнечного излучения облаками, атмосферой и поверхностью Земли и собственным тепловым излучением. На низких орбитах плотность этого теплового потока может достигать 40% плотности потока прямого солнечного излучения, но с увеличением высоты плотность уменьшается.

Тепловые потоки, идущие на КЛА от звезд, практически малы. Наконец, энергия излучений участков межзвездного пространства, лишенных каких-либо источников, соответствует температуре -269°C .

Радиационные пояса Земли имеют сложную структуру и представляют собой относительно стабильные гигантские области скопления электронов и протонов высоких энергий, захваченные и удерживаемые магнитным полем Земли. Можно выделить две области — внутренний (протонный) и внешний (электронный) пояса.

В космическом вакууме любой материал выделяет газы и пары, примеси и добавки, адсорбированные на поверхности и абсорбированные в объеме материала. В последнем случае процессу газовой выделения предшествует диффузия атомов и молекул к поверхности.

Космический вакуум может вызывать ускоренную сублимацию поверхностных слоев материалов, что сказывается на уменьшении массы и изменении свойств поверхности материалов.

В результате газовой выделения и потерь быстролетучих компонентов

при длительном пребывании в условиях разреженной среды могут изменяться свойства, связанные с теплофизическими и диэлектрическими характеристиками материалов (теплопроводность, электрическая проводимость).

Отсутствие защитных газовых и оксидных пленок, сублимация поверхностных слоев приводят к изменению оптических радиационных характеристик поверхностей. Так, например, при давлении 10^{-6} Па и ультрафиолетовых излучениях с $\lambda \approx 0,22$ мкм у белых покрытий обычно возрастает отражательная способность. Даже при малых потерях O_2 , N_2 и H_2O в вакууме при высоких температурах могут возникать значительные изменения излучательной способности некоторых типов керамик.

Совместное действие высокого вакуума и ультрафиолетового излучения вызывает эффект «отбеливания», в результате чего возрастает отражательная способность поверхности и облегчаются условия охлаждения аппаратуры.

В вакууме отсутствует конвективный теплообмен и теплопроводность среды, а передача тепла извне происходит только путем лучистого обмена. Различают три режима течения газов и, соответственно, три режима теплопередачи в них: вязкостный, молекулярно-вязкостный и молекулярный. Границы между этими режимами определяются значениями критерия Кнудсена Kn , который равен отношению средней длины свободного пробега L_0 частиц газа к характеристическому линейному размеру рассматриваемой системы l : $Kn = L_0/l$.

Границы режимов следующие:

$Kn \leq 0,005$ — вязкостный режим;

$0,005 \leq Kn \leq 5,0$ — молекулярно-вязкостный режим;

$Kn > 5,0$ — молекулярный режим.

При вязкостном и молекулярно-вязкостном режимах теплообмен складывается из передачи тепла теплопроводностью, конвекцией и лучистым обменом. При молекулярном режиме теплопередача осуществляется за счет лучистого обмена.

В условиях низкого давления в космосе на наружных и внутренних поверхностях разделов материалов возникают либо микроскопические поверхностные трещины, либо интеркристаллитная коррозия. Из-за изменения свойств поверхностных слоев изменяются объемно-механические свойства материалов (прочность при ползучести, сопротивление усталости и т.п.).

Так как в вакууме поверхностные адсорбированные газовые слои улетучиваются, а оксидные пленки могут разрушаться, то возрастает адгезия и резко увеличиваются силы трения, что может привести даже к свариванию трущихся деталей.

На открытых частях космических аппаратов появляются поверхностные заряды. Причина их появления — совместное действие корпускулярной и коротковолновой электромагнитной радиации, сверхглу-

бокого вакуума, а также взаимодействие поверхности с окружающей КЛА плазмой. Накопление заряда приводит к электрическому пробое, который дает наибольший уровень помех на частоте около 38 МГц. Электрическое поле повреждает емкостные элементы изделий, а магнитное поле наводит поверхностные токи, которые сказываются на работоспособности расположенных внутри электронных схем.

При свободном полете КЛА гравитационные силы и ускорения имеют значения на много порядков меньшие, чем в обычных, земных условиях. Такие условия называются невесомостью. Влияние невесомости может сказываться, например, при движении топлива в гидросистемах, когда доминируют не вес и сила давления, а силы межмолекулярного взаимодействия как внутри жидкости, так и между жидкостью и газом (паром), жидкостью и ограничивающими ее стенками. Жидкие хладагенты, не полностью заполняющие емкость, в условиях невесомости стремятся принять сферическую форму, при которой поверхностная энергия имеет минимальное значение. Дополнительное влияние на жидкость оказывают ускорения и силы, обусловленные аэродинамическим торможением, работой двигателей ориентации и стабилизации, солнечным давлением, неоднородностью гравитационного поля Земли и т.п. Порядок ускорений, обусловленных этими факторами, лежит в диапазоне $10^{-5} - 10^{-9} g$.

В условиях невесомости возникает проблема обеспечения теплового режима работы как оборудования КЛА, так и человека в отсутствие естественной конвекции, вызываемой силами тяжести.

Воздействие проникающей радиации приводит к нарушению кристаллической решетки: радиационно-химическим превращениям, вызывающим диссоциацию молекул; образованию ионизированных, химически активных молекул; образованию центров окраски, определяющих уровень поглощения света и являющихся дефектами кристаллической решетки; проникновению пар Френкеля; радиационному нагреву; радиационной люминесценции.

Метеорные частицы могут пробить стенки КЛА. Возникает вероятность повреждений от волны давления, образующейся в самом материале под действием метеорной частицы. Число микрократеров, приходящихся на единицу поверхности в год, может колебаться от 1 до 10^4 шт./см².

Образование плазмы при микрометеорных ударах на открытых электродах высоковольтных устройств создает предпосылки для возникновения электрических пробоев. За счет образования микрократеров происходит постепенное удаление вещества с поверхности, бомбардируемой частицами что вызывает эрозию поверхности. Прежде всего ухудшаются оптические характеристики поверхностей зеркал, призм, линз оптических приборов и иллюминаторов. При скоростях соударения менее 1 км/с, которые характерны для метеоритных осколков лунного грунта и частиц марсианских пылевых бурь, плавления бомбардируемой поверхности не происходит.

Если рассматривать искусственные факторы окружающей среды, действующие на конструкцию КЛА, то в первую очередь можно отметить интенсивные механические нагрузки, связанные с колебаниями, ударами, высокими значениями скоростного напора, действие высоких температур и т.д.

В процессе эксплуатации КЛА возможны два типа колебаний.

Траекторные колебания — колебания КЛА как абсолютно жесткого тела, зависящие в основном от параметров траектории полета. Частоты траекторных колебаний находятся в диапазоне от долей до нескольких герц.

Упругие колебания — изменения напряженно-деформированного состояния КЛА. Частоты упругих колебаний, влияющих на общее напряженно-деформированное состояние КЛА, охватывают диапазон от 20 до 2500 Гц. Сила тяжести, некоторые динамические силы, давления в баках и тяга являются постоянно действующими силами, и их обычно называют программными силами. Всякое отклонение значений внешних сил от программных относят к категории внешних возмущающих сил. К таким силам можно отнести порывы ветра, отклонение направления действия тяги от продольной оси. Во многих случаях нагрузки от ветра оказываются определяющими для прочности конструкции тяжелого КЛА. Скорость ветра зависит от географической широты места старта, времени года и суток, а в основном от высоты полета H . Примерный график изменения средней скорости ветра по относительной высоте показан на рис. 1.6, где символом H_T обозначена высота тропопаузы, на которой обычно скорость ветра наибольшая.

Тяга от ДУ по своей природе является поверхностной силой. Однако на корпус она передается либо в виде сосредоточенных сил (в местах присоединения рамы ДУ), либо в виде распределенной по контуру поперечного сечения нагрузки (при наличии сравнительно большого числа опорных точек у рамы) и определяется как

$$R = R_0 + F_0 (p_0 - p_H),$$

где R_0 — стендовое значение тяги, Н; F_0 — площадь выходного сечения сопла двигателя, m^2 ; p_0 — атмосферное давление у Земли, Па; p_H — давление внешней среды на наружную поверхность корпуса сопла, Па.

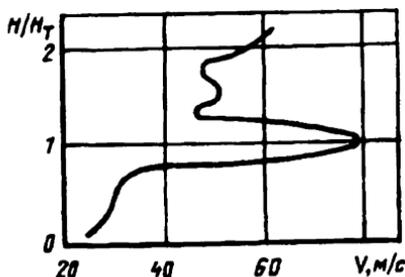


Рис. 1.6. Изменение средней скорости ветра по относительной высоте

Аэродинамические нагрузки, возникающие при движении в плотных слоях атмосферы на поверхности КЛА, характеризуются скоростным напором $q = \frac{\rho v^2}{2}$. Значения этих сил в каждой точке поверхности корпуса характеризуются нормальной и касательной составляющими давления.

Основная часть аэродинамической нагрузки действует на головную часть корпуса. На расстоянии двух-трех диаметров от места стыка конической части с цилиндрической подъемная сила при малых углах атаки практически уже не действует.

Акустическое воздействие связано с возбуждением сильных колебаний среды в диапазоне звуковых частот. Источником акустических колебаний являются, например, различного рода шумы, создаваемые работой двигателей.

Интенсивность шума, создаваемого струей реактивного двигателя, пропорциональна ее средней скорости в степени от 6 до 8. При этом акустическая мощность составляет 0,4 — 0,8% от механической мощности двигателя. Отсюда следует, что с увеличением тяги двигателя КЛА возможно пропорциональное увеличение суммарного уровня акустической нагрузки на поверхность их корпуса. Когда эти уровни превышают 150 дБ, воздействие акустических нагрузок оказывает существенное влияние на режимы вибрации элементов конструкции КЛА.

Напряжения в конструкции в основном определяются видом амплитудно-частотной характеристики конструкции. Поэтому отдельные элементы имеют наибольшие колебания с собственными частотами. Колебания могут существенно увеличиваться из-за механической передачи энергии с одной поверхности на другую.

Основным источником нагревания конструкции КЛА в сверхзвуковом полете является ударный и пограничный слой, где кинетическая энергия потока, движущегося с большой скоростью относительно поверхности КЛА, преобразуется в теплоту по мере того, как относительная скорость движения воздуха в пограничном слое уменьшается до нуля. Повышение температуры газа приводит к нагреванию поверхности и дальнейшему распространению теплоты внутрь конструкции. Это явление называется аэродинамическим нагреванием. В полете КЛА нагревается также за счет теплоты, выделяющейся при работе двигательной установки и электронного оборудования, за счет излучения Земли, Солнца и при скоростях свыше 10 км/с — за счет излучения газов ударного слоя. Однако эти источники нагревания для КЛА, совершающих полет со сверхзвуковыми скоростями в пределах атмосферы, имеют второстепенное значение. Одновременно с нагреванием конструкции происходит рассеивание тепловой энергии излучением с нагретой поверхности КЛА в окружающее пространство. Вследствие этого тепловой поток в конструкцию уменьшается.

При числах $M = 7$, когда температура торможения воздуха достигает примерно 2000 К, колебания атомов в молекулах становятся столь значительными по амплитуде, что молекулы начинают распадаться на атомы — диссоциировать. Этот процесс сопровождается поглощением большого количества теплоты. Так, например, для гиперзвуковых скоростей полета при $M > 7$ при определении температур торможения необходимо учитывать диссоциацию молекул воздуха.

Разделение факторов воздействия окружающей среды на естественные и искусственные позволяет рассмотреть нагрузки с точки зрения влияния их на работоспособность систем КЛА в период эксплуатации. Нагрузки, действующие на конструкцию КЛА и его системы, можно разделить на две группы:

— основные воздействия, на которые система должна реагировать (порывы ветра, температура КЛА и т.д.);

— вредные воздействия, на которые система не должна реагировать (вибрации, удары, центробежные и линейные ускорения и т.п.). Эти воздействия называют также дестабилизирующими факторами, нарушающими нормальную работу систем.

Такое распределение основывается не на физической природе нагрузки, а на отношении к этой нагрузке различных систем, так как воздействие одной и той же нагрузки для одной системы может рассматриваться как полезное действие, а для другой — как вредное, дестабилизирующее ее работу. Так, например, механические нагрузки, связанные с порывами ветра, можно рассматривать как основные для автопилота и как вредные, дестабилизирующие для других систем.

Распределение воздействий важно с точки зрения установления очередности испытаний систем, так как в первую очередь необходимо испытывать систему при воздействии основных факторов и только затем испытывать систему и выявлять характер ее поведения при воздействии вредных, дестабилизирующих факторов.

Если рассматривать влияние внешних силовых нагрузок с точки зрения влияния их на напряженно-деформированное состояние частей конструкции ЛА и на значения соответствующих внутренних усилий, определяющих силовое взаимодействие частей конструкции между собой, то по характеру распределения все нагрузки могут быть разделены на поверхностные и массовые (объемные).

Поверхностные нагрузки распределяются на поверхности элементов конструкции и характеризуются давлением или значением равнодействующей силы. Массовые нагрузки распределяются по объему элементов конструкции и пропорциональны плотности их материала. Значения массовых нагрузок обычно характеризуются коэффициентом перегрузки. Основным источником массовых (инерционных) нагрузок для отдельных элементов и даже частей (агрегатов) конструкции ЛА является вибрация (общие или местные ускорения колебательного характера).

Все внешние поверхностные нагрузки подразделяют на квазистатические (статические), относительно медленно изменяющиеся по времени, и на динамические, вызывающие упругие колебания конструкции ЛА.

Эффект динамического действия внешних поверхностных сил (проявляющийся в возбуждении упругих колебаний) зависит главным образом от динамических характеристик конструкции самого аппарата. Поэтому обычно в качестве критерия указанной классификации выбирается период (или частота) свободных упругих колебаний конструкции в целом или ее частей и элементов. Если время изменения внешней поверхностной нагрузки велико по сравнению с рассматриваемым периодом свободных упругих колебаний (чаще всего низких тонов), то она относится к категории статических или квазистатических, и наоборот. Таким образом, одна и та же внешняя сила в одном случае нагружения может считаться квазистатической, а в другом случае — динамической.

Тепловые нагрузки (характеризуемые скалярным полем температур) чаще всего оказывают заметное влияние на прочность конструкции тех ЛА, скорости движения которых в относительно плотных слоях атмосферы сравнительно велики (начиная со скорости порядка 2,5 М и выше). Это может проявляться в изменении физико-механических свойств материалов, в появлении эффекта ползучести и дополнительных температурных деформаций. В некоторых случаях нагрев конструкции может приводить к изменению жесткости отдельных частей, а следовательно, и к изменению характера распределения внешних поверхностных нагрузок и динамических характеристик самой конструкции.

Следует также учесть, что на выравнивание температуры по массе материала требуется время, определяемое теплофизическими параметрами материалов. Поэтому возможно неравномерное распределение температуры по элементам конструкции ЛА с существенно нестационарным режимом движения в плотных слоях атмосферы, т.е. возникновение дополнительных температурных напряжений. Деформация конструкции при неравномерном нагреве подобна деформации, обусловленной статическим действием некоторой эквивалентной системы внешних сил.

Учитывая изложенное, при проектировании многих КЛА принимают соответствующие меры к устранению или снижению степени влияния тепловых нагрузок на несущую способность конструкции. В отдельных случаях для этой цели разрабатываются специальные теплозащитные покрытия и даже теплозащитные системы. Параметры этих покрытий (или систем) определяются уровнем внешних тепловых потоков и особенностями конструкции аппаратов, свойствами материала и уровнем напряженного состояния.

При нестационарных процессах нагрева возможно проявление и динамического эффекта теплового нагружения. В принципе возможно даже возбуждение колебаний тонкостенных конструкций посредством импульсивных тепловых воздействий.

Таким образом, условия внешнего нагружения конструкции КЛА характеризуются векторным полем внешних силовых воздействий и скалярным полем температур. Параметры этих полей являются функцией времени движения КЛА.

Практически функции внешнего силового и теплового нагружения регламентируются (в некоторых пределах) программой эксплуатации или профилем полета КЛА. В соответствии с такой программой всегда можно выделить серию указанных режимов нагружения для основных частей конструкций.

Глава 2. НАЗЕМНАЯ ОТРАБОТКА КЛА

2.1. Стендовая база для испытаний

В настоящее время стендовые испытания КЛА проводят как на натуральных объектах, так и с помощью математического или физического моделирования (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Классификация стендовых испытаний КЛА

Основным достоинством математического моделирования является его сравнительно невысокая стоимость. Но есть у него и существенные недостатки. Для математического моделирования нужно знать достаточно большое количество коэффициентов, позволяющих описать условия функционирования испытуемого объекта. При составлении математической модели обычно делается много допущений и упрощений, поэтому математическое моделирование является неполным.

Под физическим моделированием понимают замену изучения интересующего нас явления в природе изучением аналогичного, физически подобного ему явления на модели меньшего масштаба в лабораторных условиях. По результатам опытов с моделями делают заключение о характере эффектов и физических величинах, определяющих явление в натуральных условиях.

Если рассматривать структурную схему материального обеспечения испытательных работ, то наиболее крупной единицей является стендовая база, предназначенная для экспериментальной отработки определенного класса КЛА.

Стеновая база представляет собой совокупность испытательных комплексов. Наземные испытательные стендовые комплексы позволяют имитировать физические воздействия, которым подвергается КЛА в натурных условиях. Испытательные стенды могут объединяться по направлениям и образовывать, например, комплексы механических, тепловых, климатических, электрических, биологических, химических, магнитных, электромагнитных и радиационных испытаний. Каждый испытательный комплекс объединяет ряд близких по назначению и имитирующих однородные нагрузки испытательных стендов. Сложность испытательных стендов зависит от требуемой полноты имитации воздействий внешних условий и размеров испытываемых объектов.

Испытательные стенды могут быть:

- 1) узкоспециализированными (стенды, предназначенные для осуществления конкретных космических программ);
- 2) универсальными (стенды широкого назначения).

Рассмотрим основной принцип создания конструкций испытательных стендов.

Разнообразные стенды, предназначенные для испытаний и определения работоспособности как ЛА в целом, так и его элементов разного назначения, в принципе имеют единую функциональную схему (рис. 2.2).

Исследуемая конструкция КЛА подвергается определенным внешним воздействиям, например тепловому и механическому, по заданной программе.

Силовая нагрузка, изменение формы образца и его температуры измеряются соответствующими датчиками, сигналы от которых поступают на регистрирующие приборы и на системы управления силовым нагружением и нагревом.



Рис. 2.2. Схема испытательной системы

Для определения исследовательской ценности испытательных стендов необходимы критерии их количественного сравнения.

В настоящее время существуют методики оценки качества испытательных систем, основанные на ранжировании основных показателей качества каждого элемента системы и определении результирующих интегральных оценок.

Испытательные системы можно классифицировать по видам нагружающих воздействий на входе и по характеру полученной информации на выходе.

К показателям нагружающего воздействия относится количество видов физических нагрузок на исследуемый объект, а к показателям получаемой информации — количество видов измерений, которые могут быть выполнены в данной системе.

Указанные функциональные элементы системы можно характеризовать тремя независимыми параметрами:

- точностью измерения и управления режимами испытательных средств;
- степенью автоматизации исследований;
- уровнем математического обеспечения (МО) экспериментов.

Такую взаимосвязь можно представить в виде графа оценок испытательных систем (рис. 2.3).

Вершины графа определяют степень совершенства компонентов системы: n, m — количество оцениваемых управляемых и измеряемых параметров соответственно; α, μ — оценки точности управления и измерения;

β, η — оценки степени автоматизации измерительных и управляющих систем; γ, ν — оценки уровня математического обеспечения соответственно в системах нагружающего воздействия и получения информации; C — оценка качества системы.

Учитывая независимость оценок качества отдельных элементов, их можно представить в виде ортогональных векторов, каждый из которых удовлетворяет аксиомам тождества, рангового порядка и аддитивности.

Тогда оценку качества испытательной системы можно представить в виде соотношения [1]

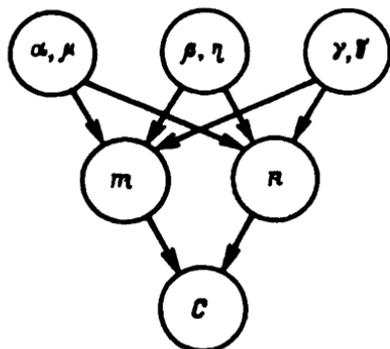


Рис. 2.3. Граф оценок испытательных систем

$$C = \left[\left(\sum_{i=1}^n \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2 + \gamma_i^2} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m \sqrt{\mu_i^2 + \eta_i^2 + \delta_i^2} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

С целью оценки качества каждого компонента соотношения сформулируем для $\alpha, \mu, \beta, \eta, \gamma, \delta$ шкалу порядка, а для n и m — шкалу наименований.

В случае многофункциональных испытательных систем оценка n и m определяется количеством управляемых и измеряемых параметров. К управляемым параметрам n относятся следующие виды воздействия на конструкцию, оценка которых составляет 1 балл: растяжение-сжатие; кручение; изгиб; нагрев; охлаждение; растяжение-сжатие (циклическое); изгиб (циклический); кручение (циклическое).

К параметрам m , характеризующим возможности систем измерения, относятся показатели, позволяющие производить количественную оценку данного вида нагружения и реакции на него материала образца. Наличие каждого вида измерения оценивается в 1 балл.

Измерениям по предложенной методике подлежат следующие показатели: нагрузка; удлинение образца; изменение диаметра образца; температура; давление окружающей среды; число циклов; декремент колебаний; время нагружения.

Далее оценивается точность измерения параметров, для чего формируется шкала порядка для оценки точности управления и измерения $\alpha; \mu$. Оценку каждого последующего уровня предпочтения определяем как сумму оценок всех предыдущих уровней плюс единица.

Уровни предпочтения и их оценки таковы: погрешность измерения 2% оценивается в 0 баллов; 1% — 1 балл; 0,5% — 2 балла; 0,25% — 4 балла; 0,1% — 8 баллов; 0,05% — 16 баллов.

Шкала порядка для оценки уровня автоматизации управляющего воздействия включает следующие уровни и их оценки в баллах: 1) ручное управление — 0 баллов; 2) автоматическая стабилизация параметров — 1 балл; 3) автоматическое программное управление режимами испытательной установки с помощью автономных программирующих блоков — 2 балла; 4) автоматическое программное управление режимами испытательной установки с помощью ЭВМ — 4 балла; 5) автоматическое программное управление режимами нескольких экспериментальных установок — 8 баллов.

Для определения уровня автоматизации обработки данных имеем такую шкалу порядка и его оценки в баллах: 1) ручная расшифровка и обработка данных, технические средства — первые самописцы — 0 баллов; 2) регистрация экспериментальных данных на машиночитаемых носителях (перфоленте, магнитной ленте и т.д.), технические средства — информационно-измерительные системы широкого на-

значения — 1 балл; 3) первичная обработка данных в реальном времени (сжатие данных, фильтрация, преобразование в истинные значения, определение экстремумов и т.д.), технические средства — микро-ЭВМ, мини-ЭВМ — 2 балла; 4) вторичная обработка данных в реальном времени (расчет по детерминированным алгоритмам), технические средства — микро-ЭВМ, мини-ЭВМ — 4 балла; 5) вторичная обработка данных нескольких экспериментальных установок в реальном времени — 8 баллов.

Векторный показатель характеризует МО для выработки требуемых управляющих воздействий. Ранжирование основных характеристик позволяет сформировать шкалу порядка: МО отсутствует; МО включает в себя только служебные программы (загрузчик, драйверы, ассемблер); МО включает в себя управляющие программы пользователей.

Показатель оценки в баллах характеризует МО для дальнейшей обработки данных. Имеем следующую шкалу порядка: 1) МО отсутствуют — 0 баллов; 2) МО включает в себя только служебные программы — 1 балл; 3) МО включает в себя библиотеку стандартных программ (вычисление функций, выполнение арифметических операций с фиксированной и плавающей запятой с одинарной и двойной точностью и т.д.) — 2 балла; 4) МО включает в себя пакеты прикладных программ пользователей, в которые входят стандартные программы расчета основных механических характеристик — 4 балла; 5) МО включает в себя операционную систему — 8 баллов; 6) МО включает в себя программы построения моделей исследуемых материалов — 16 баллов; 7) МО включает в себя программы анализа моделей и построения теории — 32 балла.

Приведенная методика позволяет определить основные недостатки и преимущества различных испытательных стендов, а следовательно, и пути их совершенствования. Такая методика особенно нужна при оценке вновь создаваемых технических средств испытаний материалов, так как позволяет не только дать общую характеристику уровня технических средств, но и правильно построить стратегию проектирования.

2.2.

Испытания на воздействие механических факторов

В соответствии с воздействующими механическими факторами (рис. 2.4) механические испытания делятся на следующие виды: испытания на воздействие статических нагрузок, испытания

воздействие динамических нагрузок, испытания на последовательное или одновременное воздействие каких-либо комбинаций из названных нагрузок.

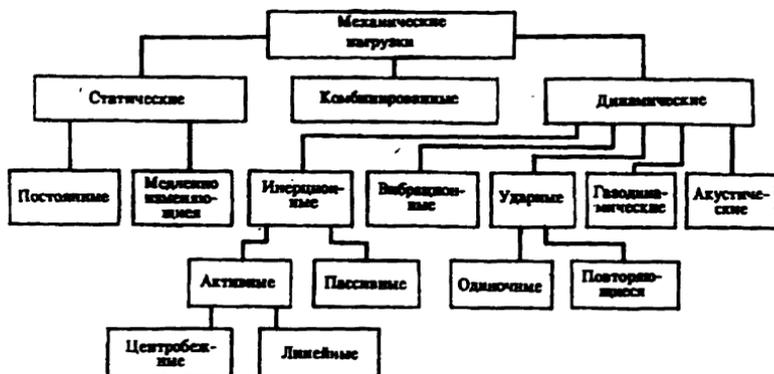


Рис. 2.4. Виды механических нагрузок

Механические нагрузки реализуются с помощью специальных механических нагружателей. Выбор нагружателя определяется его способностью воспроизводить нагружения в заданных пределах и по заданному закону, а также габаритами, стоимостью, видом потребляемой энергии и т.д.

2.2.1.

Статические испытания

Известные способы воспроизведения поверхностных нагрузок при обычных статических испытаниях в большинстве случаев основаны на замене распределенных сил (натурные условия работы) системой элементарных сосредоточенных сил (стендовые условия испытаний). Такие силы передаются на обшивку обычно при помощи парусиновых лямок (рис. 2.5) с использованием рычажных систем, каждая из которых может объединять десятки элементарных сосредоточенных сил (рис. 2.6).

Рассмотрим пример расчета рычажной системы. При деформации испытуемой конструкции рычаги поворачиваются по направлению действия моментов внешних сил. При этом в их шарнирах возникают моменты трения m , знаки которых противоположны знакам изгибающего и крутящего моментов, действующих на испытуемую конструкцию (рис. 2.7,а).

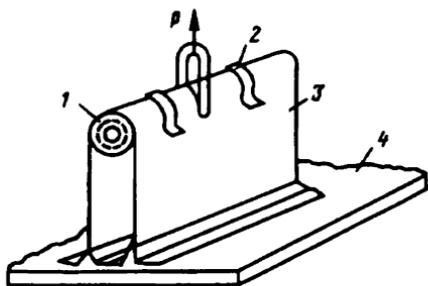


Рис. 2.5. Схема крепления парусиновыми лямками:
1 — валки; 2 — пружинный зажим;
3 — лямка; 4 — обшивка

Появление моментов трения приводит к уменьшению момента, передаваемого на испытываемую конструкцию, на величину

$$M_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^k m_i l_i, \quad (2.1)$$

где k — число шарниров в рычагах, объединяющих элементарные силы, на рассматриваемой части конструкции; m_i — момент трения в i -м шарнире; l_i — косинус угла между векторами момента m_i и момента

действующего на испытываемую конструкцию.

Момент $M_{\text{тр}}$ для плоской рычажной системы будем определять в условиях, когда

$$l_1 = l_2 = \dots = l_{k-1} = l_k. \quad (2.2)$$

Поворот рычага происходит без вращения тяг в его шарнирах до тех пор, пока смещение равнодействующей силы (см. рис. 2.7,а) не приведет к возникновению момента m_p , равного сумме моментов трения во всех его шарнирах:

$$P_{\text{ср}} \Delta x = m_p = m_1 + m_2 + m_{\text{ср}}. \quad (2.3)$$

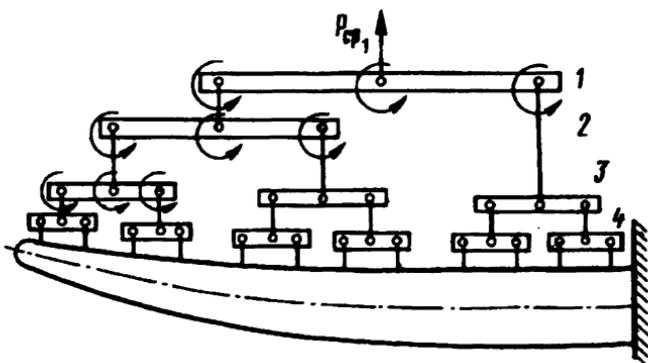


Рис 2.6. Схема моментов сил трения, возникающих в шарнирах рычажной системы при нагружении (1,2,3,4 — ярусы)

Этот момент уравнивается за счет изменения сил, действующих на плечи рычага P_1 и P_2 , на величину

$$\Delta P = \frac{m_p}{L}, \quad (2.4)$$

где L — расстояние между крайними шарнирами рычага.

Момент трения в шарнире m (рис. 2.7,б) можно определить по формуле

$$m = \frac{\eta P d}{2}, \quad (2.5)$$

где η — коэффициент трения; d — диаметр болта.

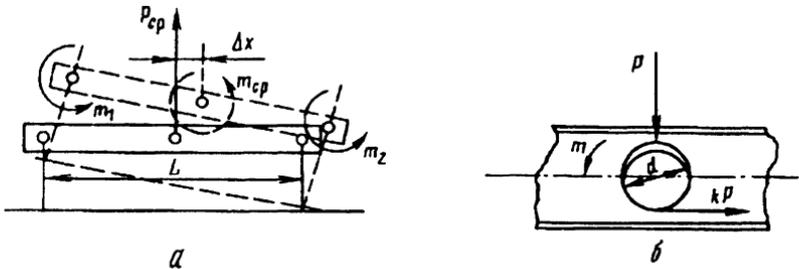


Рис. 2.7. К определению моментов сил трения в шарнирах рычага

Для рычагов из прокатной стали (уголок, швеллер и др.) со стальными болтами $\eta = 0,3 \div 0,5$.

Если диаметры крайних болтов одинаковы, т.е. $d_1 = d_2$, используя уравнения (2.3) и (2.5), найдем

$$m_p = \frac{\eta P_{cp}}{2} (d_{cp} + d_{кр}), \quad (2.6)$$

где d_{cp} и $d_{кр}$ — диаметры болтов среднего и крайнего шарниров.

Для многоярусной системы (см. рис. 2.6) сумма $P_{срi}$ для всех рычагов любого j -го яруса равна $P_{ср}$ рычага 1-го яруса:

$$P_{ср.} = \sum_{i=1}^n P_{срj, i}, \quad (2.7)$$

где n — число рычагов в ярусе; j — номер яруса.

Для симметричной системы с равноплечими рычагами

$$P_{кр} = \frac{1}{2} P_{ср} . \quad (2.8)$$

Если подобрать болты рычажной системы из условия работы их на срез ($d = \sqrt{2P/(\pi/\tau_{доп})}$), то при одинаковом допустимом касательном напряжении $\tau_{доп}$ для всех болтов получим

$$d_{кр} = \frac{d_{ср}}{\sqrt{2}} , \quad (2.9)$$

откуда

$$m_p = \frac{\eta}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) d_{ср} P_{ср} \sim 0,86 \eta d_{ср} P_{ср} . \quad (2.10)$$

Так как в симметричной системе количество рычагов в любом j -ом ярусе равно $n=2^{j-1}$, то

$$P_{срj} = \frac{P_{ср1}}{2^{j-1}} . \quad (2.11)$$

Тогда

$$d_{срj} = d_{ср1} \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^{j-1} . \quad (2.12)$$

Из (2.11) и (2.12) найдем моменты трения в шарнирах рычажного j -го яруса

$$m_{\Sigma j} = 0,86 \eta P_{ср1} d_{ср1} \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^{j-1} , \quad (2.13)$$

а в шарнирах всей системы

$$M_{тр} = 0,86 \eta P_{ср1} d_{ср1} \sum_{j=1}^s \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^{j-1} . \quad (2.14)$$

Воспользовавшись формулой для суммы s членов геометрической прогрессии, получим окончательно

$$M_{\text{тр}} = 0,86 \eta P_{\text{ср1}} d_{\text{ср1}} \frac{\left(\sqrt{\frac{1}{2}}\right)^s - 1}{\sqrt{\frac{1}{2}} - 1}, \quad (2.15)$$

где s — число ярусов.

Формулу (2.15) можно записать и так:

$$M_{\text{тр}} = m_{\text{р1}} \mu(s), \quad (2.16)$$

где

$$\mu(s) = \frac{\left(\sqrt{\frac{1}{2}}\right)^s - 1}{\sqrt{\frac{1}{2}} - 1}. \quad (2.17)$$

Графическая интерпретация формулы (2.17) представлена на рис. 2.8. Она показывает, что момент трения рычажной системы с болтами, подобранными из условия работы на срез, определяется в основном несколькими первыми ярусами. Для предельного случая системы с бесконечным числом ярусов $s = \infty$, $\mu(\infty) = 3,41$, а для пяти первых ярусов $\mu(s) = 2,81$, т.е. $\mu(s) = 0,82\mu(\infty)$.

Для ориентировочной оценки момента трения рычажной системы можно принять

$$M_{\text{тр}} \approx 2,5 \eta P_{\text{ср1}} d_{\text{ср1}}. \quad (2.18)$$

Полагая $\eta = 0,4$, получаем

$$M_{\text{тр}} \approx P_{\text{ср1}} d_{\text{ср1}}, \quad (2.19)$$

т.е. при больших углах поворота рычагов системы ее равнодействующая будет смещаться примерно на диаметр среднего болта рычага

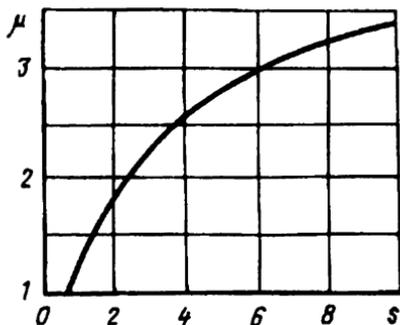


Рис. 2.8. К определению коэффициента μ

первого яруса.

Приложение большого количества сосредоточенных сил (с помощью парусиновых лямок) начинает заметно искажать температурные поля при тепломеханических испытаниях ЛА, а при испытаниях элементов конструкции с теплозащитным покрытием оно становится

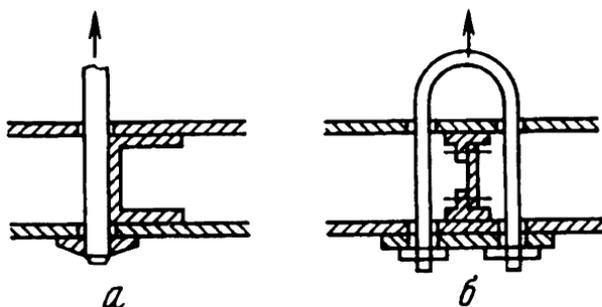


Рис. 2.9. Устройства для приложения статической нагрузки при теплопрочностных испытаниях

практически невозможным. Уменьшение же числа элементарных сосредоточенных сил вызывает возрастание их значений, и возникает опасность разрушения конструкции в местах крепления лямок. В связи с этим к устройствам для приложения силовых нагрузок к нагреваемым поверхностям при тепломеханических испытаниях предъявляются следующие довольно противоречивые требования:

- не искажать температурное поле в испытываемой конструкции;
- не изменять прочность и жесткость конструкции;
- не препятствовать деформациям конструкции во время испытаний.

Создать универсальное устройство, удовлетворяющее требованиям теплостатических испытаний, до сих пор не удалось. Обычно узлы для приложения силовой статической нагрузки должны устанавливаться на конструкции, предназначенной для теплостатических испытаний, в процессе ее изготовления.

Для приложения нагрузок вблизи силовых элементов каркаса могут быть использованы приспособления, показанные на рис. 2.9, а и б.

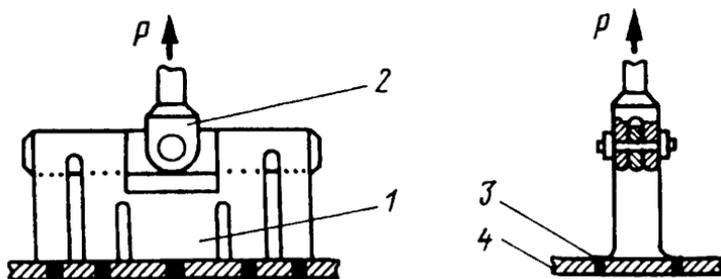


Рис. 2.10. Приложение нагрузки к нагретой обшивке:
 1 - металлическая лямка; 2 - нагружающая тяга; 3 - сварная точка;
 4 - обшивка испытываемой конструкции

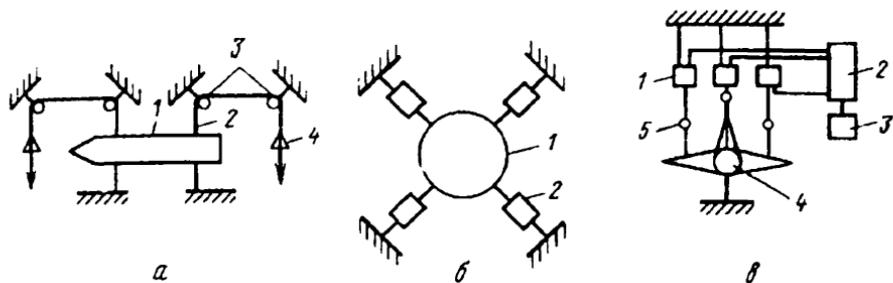


Рис. 2.11. Системы воспроизведения статических нагрузок:
а - грузовые нагрузатели (1 - испытуемый ЛА; 2 - крепление рычажной системы к объекту; 3 - система блоков; 4 - грузы); *б* - винтовые нагрузатели (1 - испытуемый объект; 2 - винтовая пара); *в* - нагрузатели на пневмо- или гидроцилиндрах (1 - гидроцилиндры; 2 - редуктор; 3 - масляная станция; 4 - испытуемый объект; 5 - рычажная система)

Приложение силовой статической нагрузки к обшивке может осуществляться за счет использования металлических лямок, которые крепятся при помощи точечной электросварки (рис. 2.10). Однако такие лямки препятствуют как лучистому, так и конвективному теплообмену и могут быть рекомендованы только для испытаний при стационарном температурном режиме.

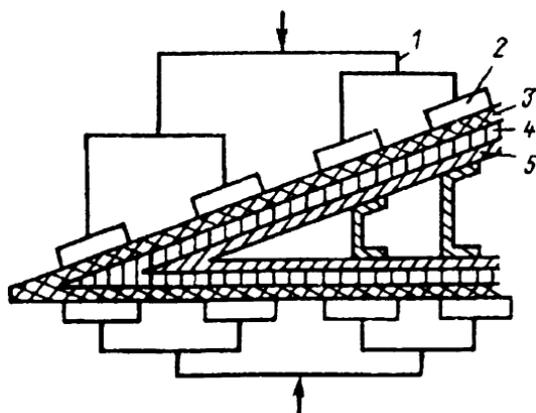
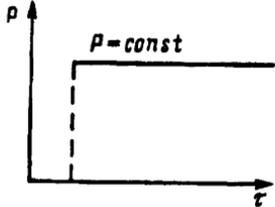
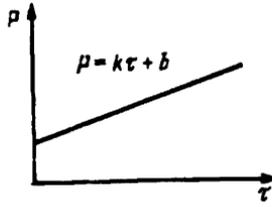
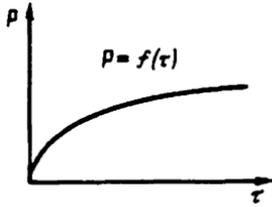


Рис. 2.12. Схема передачи силовой нагрузки при помощи вакуумных присосок:
 1 - нагружающее устройство; 2 - вакуумные присоски; 3 - ленточный нагреватель; 4 - сотовая конструкция из композиционного материала; 5 - корпус ЛА

Т а б л и ц а 2.1

СРЕДСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Вид силовой нагрузки	Постоянная	Линейно изменяющаяся	Нелинейно изменяющаяся
График			
Вид нагружателя	Грузовые, винтовые, фрикционные	На пневмо- или гидроцилиндрах, пружинные	На пневмо- или гидроцилиндрах

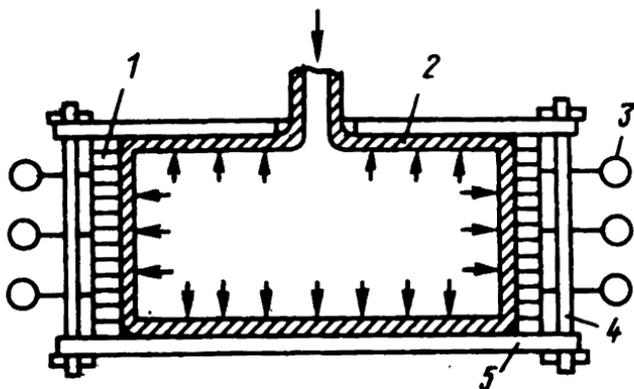


Рис. 2.13. Схема силового нагружения с использованием резиновых камер с прочными стенками:
 1 - испытываемая конструкция; 2 - резиновый мешок; 3 - тензодатчики;
 4 - силовые плиты; 5 - стяжки

Из применяемых в настоящее время средств воспроизведения механических нагрузок можно отметить три основных вида (рис. 2.11): грузовые нагружатели, винтовые нагружатели и нагружатели на пневмо- или гидроцилиндрах.

Механические статические нагрузки могут подразделяться на постоянные или медленно изменяющиеся (табл. 2.1).

В тех случаях, когда объектом испытаний на одновременное воздействие тепловых и силовых нагрузок являются элементы тепловой защиты КЛА, применяют вакуумные системы — так называемые ваку-

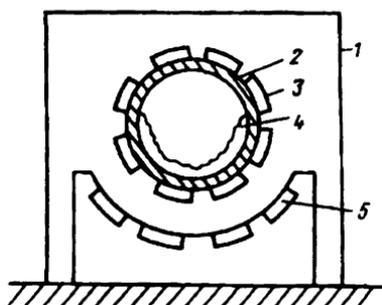


Рис. 2.14. Схема установок для испытания элементов конструкции ЛА с использованием электромагнитных силовозбудителей:
 1 - силовая рама; 2 - испытываемая конструкция; 3 - теплозащитные элементы;
 4 - ферромагнитный наполнитель; 5 - ЭМС

умные присоски, которые позволяют создать на поверхности конструкции распределенные нагрузки (рис. 2.12) или силовые системы с наддувом — резиновые мешки (рис. 2.13).

На рис. 2.14 показано устройство для испытания многослойной оболочки КЛА с теплозащитным покрытием. На силовой раме 1 закрепляется испытываемая конструкция 2 с теплозащитными элементами 3. Во внутреннюю полость помещают ферромагнитный наполнитель 4. При включении электромагнитного силового возбудителя (ЭМС) 5 под воздействием электромагнитного поля ферромагнитный наполнитель будет притягиваться к ЭМС и нагружать внутреннюю поверхность испытываемой оболочки.

2.2.2.

Вибрационные испытания

Вибрация ЛА является причиной усталостных разрушений элементов конструкции, сокращения ресурса работы двигателей, колебаний корпуса. Вибрационные перегрузки вызывают механические повреждения аппаратуры и нарушение режима работы, а в отдельных случаях могут быть причиной неработоспособности аппаратуры. При резонансной вибрации возможны обрыв проводов в местах их закрепления или соединения с деталью, нарушение герметизации, возникновение коротких замыканий между деталями и т.д. Практически причин разрушения может быть несколько, например превышение некоторого критического уровня амплитуд вибраций (что существенно для хрупких материалов, устройств типа реле и переключателей и т.п.) или накопление усталостных деформаций при уровне амплитуд вибраций, меньшем критического.

Считается, что усталостное разрушение материала происходит вследствие появления в нем локальных зон текучести, или, другими словами, скольжения атомарных слоев, которое, в свою очередь, вызывается развитием так называемых дислокаций (дефектов кристаллической решетки материала) и местных концентраций напряжений.

Вибрационное нагружение материала, в котором образовались локальные зоны текучести, способствует появлению микротрещин, которые, соединяясь случайным образом, образуют основную трещину.

Когда трещина достигает такой величины, что напряжение в оставшемся материале превышает его прочностные возможности, распространение трещины становится лавинообразным и происходит усталостное разрушение.

Основное назначение вибрационных испытаний — это проверка и обеспечение работоспособности и надежности разрабатываемых ЛА. С помощью этих испытаний проверяются состояние и характеристики элементов ЛА. При выявлении отклонения отдельных характеристик от заданных значений производится доводка элементов ЛА до требований технического задания.

Основными задачами испытаний являются:

— проверка прочности конструкции ЛА при экспериментальных и расчетных нагрузках, определение фактических запасов прочности;

— определение коэффициентов динамичности в узлах крепления комплектующих агрегатов;

— определение собственных частот и форм колебаний отдельных элементов конструкции и всего ЛА в целом;

— определение коэффициентов демпфирования отдельных агрегатов и ЛА в целом;

— оценка работоспособности комплектующих агрегатов, включая функционирующие агрегаты и кинематические узлы, после воздействия вибрационных ускорений;

— проверка виброустойчивости комплектующих агрегатов;

— определение и оценка характеристик ЛА, в том числе сохранности положения посадочных плоскостей под приборы с высокой точностью установки по отношению к осям ЛА в процессе и после воздействия вибрационных ускорений, а также при динамических возмущениях, создаваемых функционированием бортовой аппаратуры;

— проверка устойчивости ЛА к качке и длительным наклонам;

— определение характеристик ЛА при имитации условий транспортировки.

При нелинейных вибрационных испытаниях ЛА подвергается воздействию нагрузок, превышающих эксплуатационные, установленные в технических требованиях. Кроме того, испытания проводятся при совместном воздействии эксплуатационных нагрузок. Поэтому после испытаний изделие непригодно для использования в полете.

При виброиспытаниях требуется обеспечить:

1) диапазон частот вибраций в контрольных точках испытуемого изделия;

2) необходимую продолжительность испытаний, которая ограничивается испытательным ресурсом изделия;

3) настройку системы на заданный режим в установленное время;

4) точность воспроизведения и поддержания заданных спектральных характеристик в ходе испытаний.

В табл. 2.2 приведены численные значения этих параметров для испытаний подвижных объектов.

ПАРАМЕТРЫ ИСПЫТАНИЙ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Испытуемый объект	Частоты спектров, Гц		Время проведения испытаний	Время настройки систем на заданный режим, с
	низшие	высшие		
Наземные подвижные объекты	0 — 2	50 — 200	От нескольких минут до нескольких часов	10 — 60
Летательные аппараты	5 — 20	500 — 2000	От нескольких десятков секунд до нескольких часов	5 — 30

В ходе испытаний за короткое время необходимо воспроизвести заданные спектральные характеристики вибраций в широком диапазоне частот и с достаточно высокой точностью. Решение этой задачи для одномерных и в особенности для многомерных систем невозможно без применения автоматизированных систем управления виброиспытаниями.

К испытуемому изделию предъявляется ряд требований:

— изделие изготавливается по рабочим чертежам ЛА, с которыми оно должно быть идентично геометрически, механически, электрически и т.д.;

— масса M , центровка $X_{ц.м}$ и моменты инерции J_x ; J_y ; J_z изделия должны экспериментально определяться перед испытаниями для каждого конкретного ЛА;

— замена отдельных элементов изделия массогабаритными макетами допустима лишь в том случае, если это не окажет влияния на прочность и работоспособность конструкции;

— в необходимых случаях следует обеспечить герметичность испытуемых изделий;

— аппаратура испытуемого изделия проверяется на автономное комплексное функционирование с измерением основных параметров;

— комплектующие элементы и рабочие вещества, используемые в механизмах и агрегатах ЛА, должны точно соответствовать чертежам, необоснованные замены на стадии испытаний не допускаются;

— специальные узлы, устанавливаемые на изделии для его крепления или приложения нагрузки, не должны изменять прочность и жесткость конструкции, не должны препятствовать ее деформациям при испытаниях;

— на изделии устанавливаются преобразователи, необходимые для фиксации параметров.

Теоретически возможно проводить испытание всей конструкции ЛА, однако в большинстве случаев испытания проводятся на отдельных агрегатах. Это вызвано в основном следующими тремя причинами:

1. Для разных агрегатов ЛА расчетными являются различные случаи нагружения. Поэтому, проводя поагрегатные испытания, можно проверить прочность при расчетных режимах нагружения большинства агрегатов конструкции, используя один экземпляр изделия.

2. Испытания аппарата в целом сопряжены с большими техническими трудностями.

3. Нагружающее оборудование и различные управляющие и регистрирующие устройства снижают надежность всей установки. Повторный эксперимент с аппаратом часто не дает необходимой информации о его прочности и жесткости из-за остаточных деформаций, возникающих при первом эксперименте.

Испытания агрегата можно проводить как в системе аппарата, так и изолированно. Отдельные агрегаты следует поставлять на испытания вместе с переходниками, которые по своим характеристикам должны как можно точнее имитировать заменяемую ими конструкцию.

Стандовое оборудование должно удовлетворять ряду требований, основными из которых являются следующие:

— обеспечение идентичности или динамического подобия эксплуатационных процессов;

— применение конструкции узлов крепления аппарата и его агрегатов, соответствующей реальной;

— обеспечение воспроизводимости (повторяемости) процесса испытаний;

— минимальные побочные воздействия на испытуемый аппарат;

— максимальная автоматизация и механизация ручных операций, использование ЭВМ, особенно в части программного управления, контроля, регистрации данных, измерения параметров, обработки результатов;

— удобство и возможность проведения испытаний в короткие сроки и с минимальными затратами;

— мощность стенда, достаточная для обеспечения режимов испытания изделий;

— стабильность частотных параметров в пределах установленного допуска при изменении массы или нагрузки;

— наименьшее время выхода на заданный режим работы;

— использование стандартных источников подводимой мощности.

Определение динамических характеристик КЛА играет важную роль при решении проблем динамики, связанных с упругостью конст-

рукции ЛА, подвижностью жидкого топлива в баках и т.д. Основными характеристиками рассматриваемых объектов являются собственные частоты, формы колебаний, коэффициенты демпфирования и обобщенные массы.

Применение теоретических методов позволяет в настоящее время получать собственные частоты и формы колебаний только в сравнительно простых случаях. С помощью экспериментальных методов могут быть определены все динамические характеристики для самых сложных конструкций.

Рассмотрим основные методы определения собственных частот, форм колебаний, обобщенных масс и коэффициентов демпфирования, получившие наибольшее распространение на практике при проведении динамических испытаний натуральных объектов и их моделей.

В основе экспериментальных методов определения собственных частот, форм колебаний и коэффициентов демпфирования лежит допущение, что динамические свойства испытуемого объекта в заданном частотном диапазоне могут быть с достаточной точностью описаны конечной системой линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Соответствующая математическая модель обычно записывается в следующем виде:

$$A \ddot{q} + B \dot{q} + Cq = 0, \quad (2.20)$$

где A, B, C — соответственно матрицы инерции, демпфирования и жесткости; q — вектор обобщенных координат (за обобщенные координаты принимаются абсолютные перемещения точек системы).

Из соотношения (2.20) видно, что реальной системе с распределенными параметрами ставится в соответствие линейная математическая модель с конечным числом степеней свободы. В большинстве случаев этого достаточно для описания динамических свойств рассматриваемых объектов.

Второе допущение — об отсутствии диссипативных связей между главными координатами системы — выполняется при слабом демпфировании и отсутствии близких собственных частот. В этом случае уравнение (2.20) с помощью подстановки

$$q = \Psi y, \quad (2.21)$$

где Ψ — матрица собственных форм колебаний $\eta^{(1)}, \eta^{(2)}, \dots, \eta^{(n)}$, приводится к следующей системе независимых уравнений:

$$\ddot{y}_r + 2\beta_r \dot{y}_r + \sigma_r^2 y_r = 0 \quad (r=1, 2, \dots, n), \quad (2.22)$$

$$\text{где } \beta_r = \frac{h_{rr}}{2m_{rr}}; \quad \sigma_r = \sqrt{\frac{k_{rr}}{m_{rr}}}.$$

Таким образом, при указанных допущениях динамические свойства объекта характеризуются: собственными частотами σ_r ; формами колебаний $\eta^{(r)}$; коэффициентами демпфирования β_r (или $q_r = \beta_r/\sigma_r$).

Если собственные частоты и формы колебаний известны и задано распределение масс объекта, то могут быть определены обобщенные массы m_{rr} и обобщенные жесткости k_{rr} . При известных коэффициентах демпфирования β_r и обобщенных массах m_{rr} можно также определить обобщенные коэффициенты демпфирования h_{rr} .

Большинство экспериментальных методов определения собственных частот, форм колебаний и коэффициентов демпфирования основано на возбуждении гармонических колебаний объекта. Соответствующая математическая модель имеет вид

$$A \ddot{q} + B \dot{q} + Cq = F \cos \omega t, \quad (2.23)$$

где F — матрица-столбец амплитуд внешних сил F_1, F_2, \dots, F_n .

Все эти методы подразделяются на две основные группы.

К первой группе относятся методы, в которых возбуждение колебаний объекта производится простейшим способом, при помощи одной силы (или момента), и искомые величины находятся путем анализа (иногда достаточно сложного) экспериментальных частотных характеристик, полученных для различных точек системы. Эти методы называются методами анализа.

Ко второй группе относятся методы многоточечного возбуждения колебаний. Конструкция возбуждается при помощи специальной многоканальной вибрационной установки, включающей систему электродинамических силовозбудителей, так, чтобы ее колебания происходили лишь по собственной форме одного тона колебаний, представляющего интерес. В этом случае не требуется проведение сложного анализа результатов, так как все необходимые характеристики конструкции определяются как для системы с одной степенью свободы.

Методы свободных колебаний

Свободные колебания линейной системы с конечным числом степеней свободы описываются матричным уравнением (2.20). Предполагая, что диссипативные силы не связывают главные координаты, общее решение уравнения (2.20) можно записать в виде

$$q = \sum_{r=1}^n A_r \eta^{(r)} e^{-\beta_r t} \cos(\sigma_r' t + \varepsilon_r), \quad (2.24)$$

где $\sigma_r' = \sqrt{\sigma_r^2 + \beta_r^2}$; A_r ; ε_r — произвольные постоянные, определяемые начальными условиями.

В общем случае задача состоит в том, чтобы из суммы тонов колебаний, которые могут возбуждаться в системе, выделить тон, представляющий интерес, и определить его частоту, форму и коэффициент демпфирования.

В простейшем варианте предполагается, что возбуждается только один тон колебаний, и в этом случае выражение (2.24) имеет вид

$$q = A_r \eta^{(r)} e^{-\beta_r t} \cos(\sigma_r' t + \varepsilon_r). \quad (2.25)$$

При использовании рассматриваемого метода колебания системы могут возбуждаться различными способами:

- приложением импульсов;
- заданием начального прогиба;
- возбуждением в резонансе с последующим снятием возбуждения.

Собственные частоты в данном методе обычно определяются по осциллограмме процесса затухания свободных колебаний (рис. 2.15).

Строго говоря, определяется частота σ_r' , а так как демпфирование слабое, то приближенно принимается $\sigma_r' = \sigma_2$.

Собственные формы находятся путем измерения амплитуд колебаний в различных точках конструкции для одного и того же момента времени.

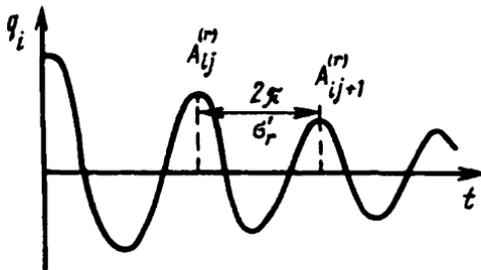


Рис. 2.15. Определение собственных частот и коэффициентов демпфирования методом свободных колебаний

Коэффициенты демпфирования, так же как и собственные частоты, определяются по осциллограмме затухающих колебаний и вычисляются по следующей формуле:

$$g_r = \frac{1}{2\pi k} \ln \frac{A_{ij}^r}{A_{ij+k}^r}, \quad (2.26)$$

где k — число периодов; A_{ij}^r , A_{ij+k}^r — амплитуды начала и конца рассматриваемого участка осциллограммы (индекс i соответствует номеру точки).

Коэффициенты демпфирования удобно определять графически с использованием логарифмической шкалы (рис. 2.16).

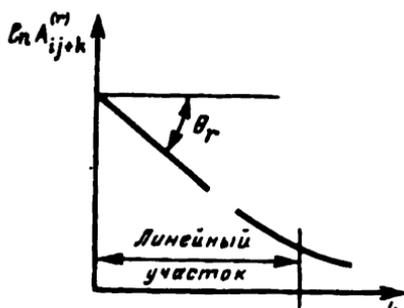


Рис. 2.16. Определение коэффициентов демпфирования графическим методом

Если демпфирование линейное, то график представляет собой прямую, тангенс угла наклона которой есть логарифмический декремент колебаний. Следовательно,

$$g_r = \frac{1}{2\pi} \operatorname{tg} \Theta_r. \quad (2.27)$$

При нелинейном демпфировании коэффициент демпфирования определяется в зависимости от амплитуды колебаний по углу наклона касательной к кривой в соответствующих точках.

Преимущество этого метода состоит в том, что при его использовании не требуется устанавливать на конструкцию специальные приспособления, приводящие в той или иной степени к изменению ее вибрационных характеристик из-за присоединения дополнительных масс.

При этом свободные колебания конструкции возбуждаются заданием ее отдельным точкам начальных отклонений или скоростей, что осуществляется путем приложения ударных импульсов различной формы или мгновенного снятия предварительно приложенной статической нагрузки.

Резонансный метод

Данный метод основан на использовании вынужденных колебаний испытуемого объекта. Колебания возбуждаются гармонической силой (или моментом), при этом измеряются амплитуды колебаний в различных точках системы в зависимости от частоты и строятся амплитудные частотные характеристики (или резонансные кривые). Искомые собственные частоты, формы колебаний и коэффициенты демпфирования определяются по резонансным пикам амплитудных характеристик.

Используя теорию вынужденных колебаний линейных систем с конечным числом степеней свободы, предполагаем, что система возбуждается силой $\Theta_j = F_j \cos \omega t$, действующей по координате q_j , а измеряется координата q_i . Тогда теоретическую амплитудную характеристику для принятой математической модели можно записать в виде модуля комплексного передаточного числа:

$$|\alpha_{ij}| = \left| \sum_{r=1}^n \frac{\eta_i^r \eta_j^r e^{i\epsilon_r}}{k_{rr} [(1 - \gamma_r^2)^2 + 4\zeta_r^2 \gamma_r^2]^{1/2}} \right|. \quad (2.28)$$

Из выражения (2.28) видно, что амплитудная характеристика состоит из отдельных слагаемых, число которых равно числу степеней свободы системы, и каждое слагаемое соответствует определенному тону колебаний.

Если реальная система удовлетворяет принятому допущению, то вынужденные частоты, соответствующие резонансным пикам амплитудных характеристик, могут быть приняты за собственные частоты системы, а совокупности амплитуд колебаний различных точек системы при этих частотах — за собственные формы колебаний.

Теоретически определение собственных частот резонансным методом сводится к отысканию частот, при которых $|\alpha_{ij}|$ достигает максимальных значений и определяется уравнением

$$\frac{\partial |\alpha_{ij}|}{\partial \omega} = 0. \quad (2.29)$$

Полученные из уравнения (2.29) резонансные частоты принимаются за собственные частоты системы σ_r . При слабом демпфировании различие между этими частотами пренебрежимо мало.

Собственные формы колебаний $\eta^{(r)}$ при использовании данного метода определяются путем измерения амплитуд колебаний в различных точках системы при резонансных частотах, т.е. определяются значения амплитудных характеристик (2.28) при частотах, полученных из уравнения (2.29). Если система возбуждена на резонансной частоте $\omega_r^* \approx \sigma_r$, в выражении (2.28) резонансный член примет вид

$$\frac{1}{2k_{rr}g_r} \eta_i^r \eta_j^r e^{-i\frac{\pi}{2}}. \quad (2.30)$$

Так как при измерении амплитуд точка возбуждения колебаний не меняется, резонансный член для любой точки измерения отличается от соответствующей составляющей формы колебаний одним и тем же постоянным множителем. Следовательно, совокупность резонансных членов является собственной формой колебаний. Чистая собственная форма колебаний может быть получена данным методом только в том случае, если нерезонансные члены в (2.28) отсутствуют. В действительности такой идеальный случай не реализуется, следовательно, достоверность форм колебаний, получаемых при использовании резонансного метода, зависит от того, насколько велико влияние нерезонансных тонов колебаний.

Резонансным методом определяют также коэффициенты демпфирования по ширине резонансных пиков. При этом предполагается, что нерезонансные тона колебаний не оказывают существенного влияния.

Коэффициенты демпфирования определяются по следующей формуле:

$$g_r = \frac{\omega_r'' - \omega_r'}{2\omega_r^*}, \quad (2.31)$$

где ω_r' и ω_r'' — характерные частоты колебаний, соответствующие пересечению r -го резонансного пика прямой, проведенной параллельно оси абсцисс на расстоянии, равном высоте пика, деленной на $\sqrt{2}$ (рис. 2.17).

Если резонансный пик амплитудной характеристики хорошо выражен, то характерные частоты, а следовательно, и искомый коэффициент демпфирования легко определяются. При слабо выраженных резонансных пиках этот простой метод может приводить к значительным ошибкам.

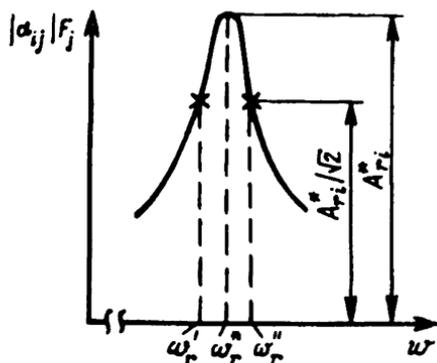


Рис. 2.17. Определение коэффициентов демпфирования резонансным методом

В случаях, когда известна обобщенная масса (или жесткость), коэффициент демпфирования можно определить, зная высоту резонансного пика:

$$g_r = \frac{\eta_i^r \eta_j^r F_j}{2m_{rr} \sigma_r^2 A_{ri}^*}, \quad (2.32)$$

где A_{ri}^* — резонансная амплитуда r -го тона колебаний (высота пика).

Определение коэффициентов демпфирования по формуле (2.32) является более надежным, чем по формуле (2.31).

Пьезоэлектрический метод

Данный метод предусматривает использование малых пьезодатчиков для определения резонансных частот испытуемых изделий. Достаточная точность определения основных характеристик обеспечивается при испытаниях изделий, размеры и масса которых

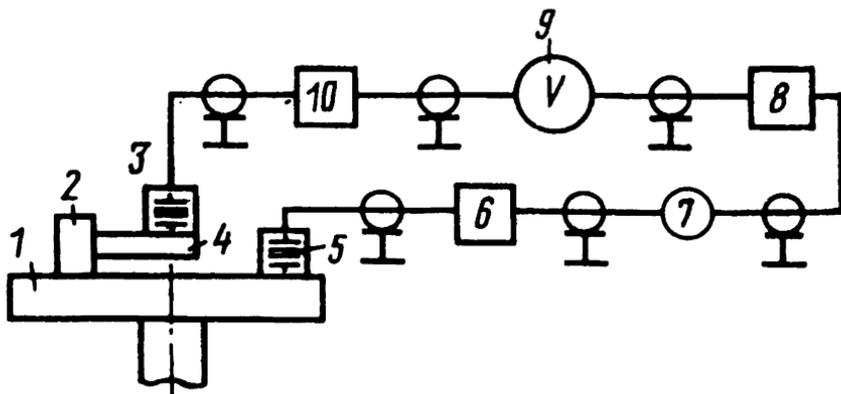


Рис. 2.18. Схема установки для определения резонансных частот пьезоэлектрическим методом

10 раз превышают размеры и массу малого пьезодатчика.

Частоты собственных колебаний таких пьезодатчиков более 100 кГц; чувствительность 0,05 — 1 мВ.

Принципиальная схема установки для определения резонансных частот пьезоэлектрическим методом представлена на рис. 2.18. Для согласования высокоомного выхода пьезопреобразователей 3, 5 с низкоомным входным сопротивлением электронных вольтметров 7, 9 необходимо применять усилители или катодные повторители 6, 10, имеющие входное сопротивление $R_{вх} \geq 300$ МОм. При плавном изменении частоты колебаний вибростенда 1 и при поддержании постоянства ускорения крепежной платы 2 на резонансной частоте образца 4 будет наблюдаться увеличение напряжения на малом преобразователе 3. На экране осциллографа 8 этому будет соответствовать поворот эллипса на 90° .

Электретный метод

Использование электретных преобразователей позволяет определять резонансные частоты испытуемых изделий различных форм. Материалом для поляризованного диэлектрика служит керамика Т-150 или полиэтилентерефталатная пленка (лавсан). В результате поляризации на поверхности электрета образуется электрический заряд большой поверхностной плотности, который может сохраняться в течение продолжительного времени.

Для определения резонансных частот электрет должен быть расположен на расстоянии 1—3 мм от поверхности испытуемого образца. При этом между электретом и образцом действует электростатическое поле, напряженность которого изменяется с изменением расстояния между ними.

Таким образом, при вибрации промежутков между образцом и электретом становится генератором переменного электрического напряжения, частота которого равна частоте вибрации f , а числовое значение пропорционально виброскорости $v = a\omega$ (a — амплитуда колебаний образца).

Принципиальная схема установки показана на рис. 2.19. Испытуемый образец крепят на крепежной плате 2 к столу 1 вибростенда и плавно изменяют частоту колебаний. При резонансе образца 3 увеличивается амплитуда его колебаний, что вызывает уве-

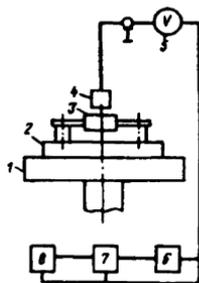


Рис. 2.19. Схема установки для определения резонансных частот электретным методом

личение напряжения на электретном преобразователе 4. Это фиксируется по милливольтметру 5 и осциллографу 7 и записывается на самописце 6. Резонансную частоту измеряют частотомером 8 при максимальном напряжении на электрете.

Емкостный метод

В данном методе используется увеличение сигнала емкостного преобразователя при резонансе, которое происходит в результате изменения емкости неподвижным электродом и вибрирующим

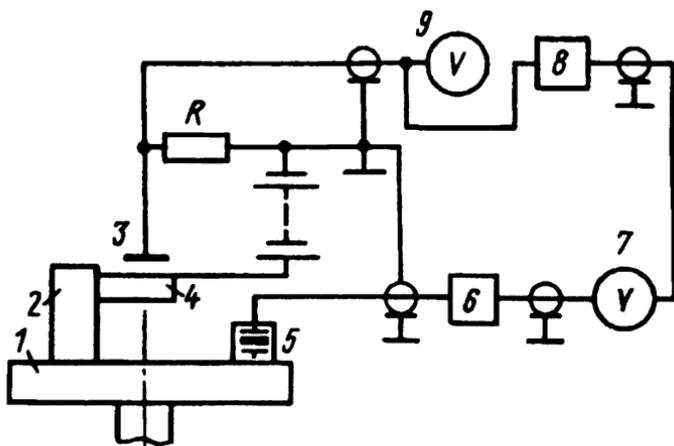


Рис. 2.20. Схема установки для определения резонансных частот емкостным методом

щим испытуемым образцом (рис. 2.20).

Исследуемый образец 4 крепят на платформе 2 к столу 1 вибростенда. Над образцом на расстоянии 1—3 мм располагают искусственный электрод 3. К промежутку образец — искусственный электрод прикладывают постоянное напряжение $U = 400 + 500$ В.

Изменение при вибрации емкости между образцом и электродом вызывает в цепи с резистором R переменный ток I , который будет пропорционален скорости вибрации. Следовательно, напряжение на резисторе R будет пропорционально виброскорости $v = a\omega$.

Сигнал с резистора R поступает на электронный вольтметр 9 и вертикальные пластины осциллографа 8. На горизонтальные пластины осциллографа приходит сигнал от задающего генератора 6. Моменту резонанса испытуемого образца будет соответствовать увеличе-

ние напряжения на вольтметре 9 и поворот эллипса на 90° на экране осциллографа. Предусматривается также контрольный пьезопреобразователь 5 и вольтметр 7.

Метод многоточечного возбуждения

При определении динамических характеристик рассмотренными выше методами основные трудности возникают из-за наличия в получаемой информации составляющих от нерезонансных тонов колебаний. Эти трудности присущи всем методам, при которых возбуждение конструкции производится в одной точке.

В последние годы все шире внедряется в практику метод определения динамических характеристик, основанный на многоточечном возбуждении колебаний конструкции. Применение многоточечного возбуждения позволяет путем специального подбора возбуждающих сил выделить поочередно «чистые» собственные формы колебаний и определить соответствующие этим формам динамические характеристики конструкции как для системы с одной степенью свободы.

Принципиальная возможность получения «чистых» собственных форм колебаний конструкции с помощью многоточечного возбуждения вытекает из общей теории вынужденных колебаний линейных систем. Задача состоит в том, чтобы найти такое распределение сил, при котором возбуждается «чистая» собственная форма колебаний.

Будем исходить из общего уравнения вынужденных колебаний системы с конечным числом степеней свободы:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = Q. \quad (2.33)$$

Если система должна колебаться по r -й собственной форме при некоторой частоте, необязательно собственной, то

$$q = A_r \eta^{(r)} \cos(\omega t + \varepsilon_r), \quad (2.34)$$

где A_r — некоторый коэффициент, характеризующий амплитуды колебаний.

Подставляя (2.34) в исходное уравнение, получаем следующее выражение для распределения сил:

$$Q = A_r \left[(C - \omega^2 A) \eta^{(r)} \cos(\omega t + \varepsilon_r) - \omega B \eta^{(r)} \sin(\omega t + \varepsilon_r) \right]. \quad (2.35)$$

Оно состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое представляет собой силу, необходимую для противодействия упругим и инерционным силам. Эта сила в фазе с перемещениями. Второе слагаемое — это сила, необходимая для компенсации диссипативных сил. Она име-

ет сдвиг фаз относительно перемещений, равный $\pi/2$. Распределения, у которых все силы по отношению друг к другу находятся в фазе или сдвинуты по фазе на 180° , будем называть монофазными.

С помощью монофазных распределений сил можно возбудить «чистые» собственные формы колебаний системы в следующих случаях: 1) если диссипативные силы в системе отсутствуют; 2) если диссипативные силы не связывают главные координаты; 3) если возбуждение производится на собственной частоте.

Наибольший интерес представляет последний случай. Полагая $Q = F \cos \omega t$ и учитывая, что при возбуждении собственной формы на собственной частоте выполняется условие

$$(C - \sigma_r^2 A) \eta^{(r)} = 0, \quad (2.36)$$

получаем $\epsilon_r = \pi/2$, и, следовательно,

$$F = A_r \sigma_r B \eta^{(r)}. \quad (2.37)$$

Таким образом, если перемещения всех точек линейной системы имеют фазовый сдвиг $\pi/2$ по отношению к монофазному гармоническому возбуждению, то система совершает вынужденные колебания по «чистой» собственной форме неконсервативной системы независимо от того, связывают диссипативные силы главные координаты или нет. При этом частота вынужденных колебаний равна собственной частоте системы.

Монофазное распределение сил в этом случае должно удовлетворять условию (2.37). Так как использование условия (2.37) для подбора сил крайне затруднено, то на практике обычно прибегают к сформулированному выше фазовому критерию резонанса. Соответствующее распределение сил подбирают либо вручную, либо в полуавтоматическом режиме работы многоканальных вибрационных установок.

Если предположить, что диссипативные силы не связывают главные координаты, то можно получить более простое выражение для монофазного силового распределения:

$$F = C_r A \eta^{(r)}, \quad (2.38)$$

где C_r — некоторая постоянная, зависящая от частоты возбуждения.

Из условия (2.38) следует, что возбуждающие силы должны быть пропорциональны инерционным силам. Это означает, что любая внешняя сила должна быть пропорциональна произведению амплитуды на соответствующую массу в данной точке конструкции.

Необходимо отметить, что собственная форма колебаний в рассматриваемом случае может быть возбуждена на частоте, несколько отличающейся от собственной частоты. Поэтому фазовый сдвиг обязательно равен $\pi/2$

Коэффициенты демпфирования при использовании многоточечного возбуждения могут определяться различными способами как для системы с одной степенью свободы. В частности, широко распространен способ, основанный на следующей формуле:

$$\xi_r = \frac{\sum_{j=1}^n \eta_j^{(r)} F_j \eta_i^{(r)}}{2m_{rr} \sigma_r^2 A_i^{(r)}}, \quad (2.39)$$

где $A_i^{(r)}$ — амплитуда колебаний некоторой характерной точки. Эта формула аналогична формуле (2.32).

Методы многоточечного возбуждения позволяют определять с высокой степенью точности динамические характеристики для самых сложных конструкций, однако они требуют сложных и дорогостоящих вибрационных установок.

Современные многоканальные вибрационные установки основаны на фазовом критерии резонанса: если все возбуждающие силы находятся в фазе или сдвинуты по фазе на 180° относительно друг друга, а общий фазовый сдвиг соответствует резонансному фазовому сдвигу, то частота вынужденных колебаний системы совпадает с собственной частотой, а форма вынужденных колебаний — с соответствующей собственной формой.

Метод добавочных масс

Метод служит для определения обобщенных масс. Сущность метода добавочных масс заключается в изменении инерционных свойств исходной системы при добавлении к ней нескольких небольших, заранее известных масс и в измерении собственных частот. При этом предполагается, что добавочные массы не вносят существенных изменений в собственные формы колебаний.

Пусть имеется система с n сосредоточенными массами, собственная частота r -го тона колебаний которой σ_r . Догружая систему в общем случае во всех n точках массами $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, получаем измененную систему, собственная частота r -го тона колебаний которой σ_r^* . Предполагая, что форма колебаний остается без изменений и используя соотношения

$$m_{rr} \sigma_r^2 = k_r \quad (2.40)$$

и

$$(m_{rr} + \Delta m_{rr}) (\sigma_r^*)^2 = k_r, \quad (2.41)$$

вытекающие непосредственно из определения собственных частот, искомую обобщенную массу можно выразить в следующем виде:

$$m_{rr} = \frac{\Delta m_{rr} (\sigma_r^*)^2}{\sigma_r^2 - (\sigma_r^*)^2}, \quad (2.42)$$

где Δm_{rr} — изменение обобщенной массы за счет добавочных масс:

$$\Delta m_{rr} = \frac{1}{A_{r1}} \sum_{i=1}^n \mu_i A_{ri}^2. \quad (2.43)$$

Если частота колебаний изменяется слабо, т.е. $\Delta \sigma_r = (\sigma_r - \sigma_r^*) \ll \sigma_r$, выражение (2.42) можно представить в более простом виде:

$$m_{rr} = \frac{1}{2} \sigma_r \frac{\Delta m_{rr}}{\Delta \sigma_r}. \quad (2.44)$$

Таким образом, для определения обобщенных масс необходимо знать добавочные массы, собственные частоты колебаний исходной и измененной системы и, вообще говоря, формы колебаний.

Добавочные массы определяются заранее, путем взвешивания. Собственные частоты и формы колебаний могут быть определены одним из методов, рассмотренных выше.

Очевидно, что чем меньше присоединяемые массы, тем точнее выполняется предположение о неизменяемости форм колебаний. Однако с уменьшением присоединяемых масс частоты σ_r и σ_r^* сближаются, и, следовательно, ошибки при определении обобщенных масс по формулам (2.42) и (2.44) должны возрастать. Это обстоятельство обуславливает повышенные требования к точности измерения частот колебаний.

Практически при выборе добавочных масс можно придерживаться следующего правила. Если с присоединением масс в какой-нибудь точке конструкции собственная частота изменяется пропорционально их значению, то изменение формы колебаний несущественно. В этом случае присоединяемые массы следует считать малыми.

При наличии аппаратуры, позволяющей измерять собственные частоты с высокой степенью точности, обобщенные массы могут также определяться по несколько видоизмененной методике. Эта методика состоит в следующем.

К конструкции последовательно добавляют малые массы в одной точке и определяют собственную частоту колебаний системы σ_r^* в зависимости от значений присоединенных масс μ_i . На основании по-

лученной зависимости находят значение производной (угла наклона) $\frac{d\sigma_r^*}{d\mu_i}$ при $\mu_i = 0$. Обобщенную массу вычисляют по формуле

$$m_{rr} = - \frac{\sigma_r A_{ri}^2 \left(\frac{d\sigma_r^*}{d\mu_i} \right)_{\mu_i=0}^{-1}}{2 A_{r1}^2} \quad (2.45)$$

Эту формулу нетрудно получить из выражений для собственных частот σ_r и σ_r^* .

Методы испытаний на вибропрочность и виброустойчивость

Виброустойчивостью называется способность ЛА, его систем и аппаратуры сохранять работоспособность в условиях воздействия вибрации. Виброустойчивость определяет степень чувствительности испытуемого объекта к динамическим нагрузкам. Она характеризуется амплитудой ускорений и частотой вибрации, при которых не нарушается нормальное функционирование испытуемого объекта.

Вибропрочность — это свойство узлов, аппаратуры и ЛА в целом противостоять разрушающему действию вибрации в заданных диапазонах частот и оставаться работоспособными после воздействия вибрационных нагрузок. Она характеризуется максимальными амплитудами ускорений, собственными частотами колебаний испытуемой конструкции, демпфирующими свойствами материала конструкции и продолжительностью действия вибрационной нагрузки.

Испытания на вибропрочность и виброустойчивость могут быть реализованы следующими основными методами:

- испытание гармонической вибрацией на фиксированных частотах;
- испытание гармонической вибрацией с использованием метода качающейся частоты;
- испытание полигармонической вибрацией;
- испытание широкополосной случайной вибрацией;
- испытание узкополосной случайной вибрацией;
- испытание натурной (реальной) вибрацией.

Испытание гармонической вибрацией на фиксированных частотах

Метод заключается в последовательном воздействии на испытуемое изделие гармонической вибрации определенной частоты и амплитуды в требуемом диапазоне частот (рис. 2.21).

При испытаниях на вибропрочность (усталость) контролируют переменную и статическую силу, приложенные к испытываемому объекту, и число циклов его нагружения.

В процессе испытаний на виброустойчивость контролируют амплитуду либо размах перемещения стола вибростенда. В программе испытаний изделий на вибропрочность и виброустойчивость в этом случае указывают поддиапазоны частот, время испытаний и амплитуды ускорений.

Рекомендуется выдерживать изделия на высшей частоте каждого поддиапазона. Продолжительность выдержки устанавливают в соответствии с требованиями технических условий.

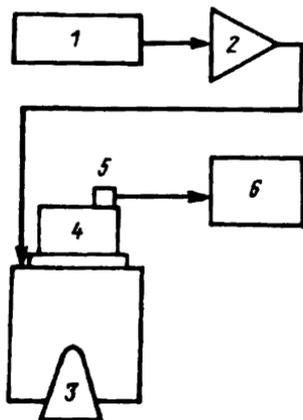


Рис. 2.21. Схема установки для испытания гармонической вибрацией на фиксированных частотах:

1 – задающий генератор; 2 – усилитель мощности; 3 – вибровозбудитель; 4 – испытуемое изделие; 5 – виброизмерительный преобразователь; 6 – виброизмерительная аппаратура

Погрешность поддержания частоты не должна превышать $\pm 10\%$ на частотах до 200 Гц и $\pm 5\%$ на частотах более 200 Гц. Если за время испытаний не было обнаружено нарушений и все параметры соответствовали требованиям технических условий, то изделие признают выдержавшим испытания.

При испытании изделий и аппаратуры методом фиксированных частот особенно важно обнаружить резонансные частоты, на которых амплитуда колебаний испытываемого изделия будет в два раза и более превышать амплитуду колебаний точек крепления. В случае обнаружения резонансных частот или частот, на которых наблюдается ухудшение параметров изделия, рекомендуется дополнительная выдержка изделия при вибрации с данной частотой с целью уточнения и выявления причин несоответствия параметров техническому заданию. Иногда

проводят длительные испытания на резонансных частотах для проверки ресурса работы конструкции.

Метод фиксированных частот имеет недостатки:

— сложность контроля перемещения, ускорения и частоты вибрации и их регулирования вручную из-за значительной неравномерности амплитудно-частотной характеристики тракта испытательного комплекса при испытаниях в широком диапазоне частот;

— невозможность выявления параметрических резонансов, вероятность пропусков резонансов отдельных элементов;

— последовательное возбуждение резонансов.

Однако этот метод до настоящего времени широко распространен в практике виброиспытаний. Он дешев и прост. Для него пригодны все виды вибростендов. Используется он в основном при заводских испытаниях серийно выпускаемых изделий.

Испытание гармонической вибрацией с использованием метода качающейся частоты

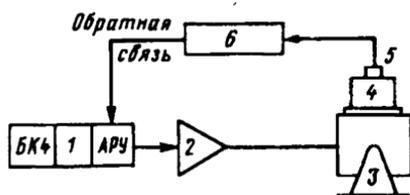
Такой метод испытаний характеризуется тем, что частоту вибрации плавно изменяют в заданном диапазоне от нижней до верхней частоты и обратно при постоянстве заданных параметров вибрации в течение определенного времени (рис. 2.22). В программе испытаний на вибропрочность методом качающейся частоты необходимо указывать диапазон частот f , амплитуду ускорения a , время прохождения диапазона частот и продолжительность испытаний.

Изменение частоты вибрации широко применяют для испытаний объектов на вибропрочность и виброустойчивость. Они пригодны для определения резонансных частот изделий и частотных характеристик. Для этих испытаний можно использовать вибростенды с вибровозбудителями, позволяющими плавно изменять частоту колебаний стола вибростенда в некоторых пределах.

Испытания с переменной частотой гармонической вибрации, как правило, ведут при постоянной амплитуде виброперемещения до частот в несколько десятков герц, а затем поддерживают постоянную виброскорость или постоянное виброускорение.

Рис. 2.22. Схема установки для испытания гармонической вибрацией с использованием метода качающейся частоты:

1 — задающий генератор, включающий блок качания частоты и автоматический регулятор уровня; 2 — усилитель мощности; 3 — вибровозбудитель; 4 — испытуемое изделие; 5 — виброизмерительный преобразователь; 6 — виброизмерительная аппаратура



При составлении программы испытаний с переменной частотой гармонической вибрации устанавливают зависимость плавно изменяющейся частоты от времени по заданным соотношениям продолжительности воздействия для различных резонирующих узлов и деталей испытываемого объекта. При этом можно исходить из требования постоянства времени или постоянства числа циклов нагружения каждого резонирующего элемента.

В первом случае частота колебаний должна изменяться по закону

$$f_t = f_1 e^{\frac{t}{\tau}}; \tau = \frac{T}{\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}, \quad (2.46)$$

во втором случае — по закону

$$f_t = \frac{f_1}{1 - \left(\frac{t}{\tau}\right)}; \tau = \frac{T}{1 - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)}, \quad (2.47)$$

где f_1 — начальная частота; f_2 — конечная частота; T — длительность изменения частоты от f_1 до f_2 ; t — текущее время; τ — постоянная времени нарастания частоты, обратно пропорциональная скорости ее нарастания

$$v_f = \frac{1}{\tau}.$$

Полагая постоянным время воздействия на каждый резонирующий элемент, получаем виброскорость

$$v_f = \frac{\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T} = \frac{1}{\tau \ln 2} \text{ окт/с}. \quad (2.48)$$

Допустимую скорость изменения частоты оцениваем неравенством

$$v_f < \frac{f}{Q^2 \ln 2}, \quad (2.49)$$

где Q — добротность резонирующего элемента, обычно $Q=20$.

Исходя из прочностных и усталостных характеристик материалов при испытаниях на вибропрочность и из допустимых норм вибрацион-

ного воздействия при испытаниях на виброустойчивость, выбирают необходимое число n полных циклов изменения частоты и общее время виброиспытаний

$$t_n = nT. \quad (2.50)$$

Преимущества этого вида испытаний — в относительно низкой стоимости оборудования. Они дают информацию для корректировки испытываемого объекта, так как может быть легко зафиксирована частота, при которой происходит его разрушение или отказ.

Недостатком испытаний с переменной частотой гармонической вибрации является то, что возбуждение различных резонансов в испытываемом объекте происходит последовательно, а не одновременно.

Испытания на виброустойчивость конструкции и ее элементов рекомендуется проводить методом фиксированных частот, а испытания на вибропрочность — методом фиксированных частот или методом качающейся частоты.

Недостаток обоих методов заключается в том, что в каждый данный момент времени на изделие воздействуют одночастотные синусоидальные колебания, а не спектр частот, как при реальных условиях.

Испытание полигармонической вибрацией

Испытание полигармонической вибрацией позволяет более точно моделировать реальную вибрацию, чем испытание на одной частоте.

Метод заключается в одновременном воздействии на изделие нескольких гармонических вибраций с различными фазами. Метод достаточно прост и отличается от методов испытания гармонической вибрацией числом задающих генераторов синусоидальных сигналов и необходимостью регулирования фазовых сдвигов между этими сигналами.

При испытаниях на вибропрочность, в частности на усталостную прочность, получило распространение бигармоническое возбуждение переменных нагрузок. На относительно низкочастотные, с большим размахом колебания нагружающей силы накладывают высокочастотную составляющую переменной силы с малой амплитудой. Подобная программа легко реализуется на испытательных стендах с электрогидравлическими возбудителями колебаний.

Виброиспытания с полигармоническим возбуждением более общего вида проводят на стендах с электродинамическими вибраторами, позволяющими осуществлять возбуждение с кратными и с произвольными частотами. В последнем случае имеется возможность имитации некоторых характеристик случайной вибрации достаточно простыми средствами, с помощью частотных синтезаторов.

Для максимального приближения условий виброиспытаний к натурным условиям эксплуатации испытуемого объекта используют полигармоническое возбуждение такого спектрального состава, чтобы имитировалось случайное возбуждение. Для этого формируют полигармонический сигнал, содержащий сравнительно небольшое число составляющих, статистически эквивалентных стационарному случайному процессу.

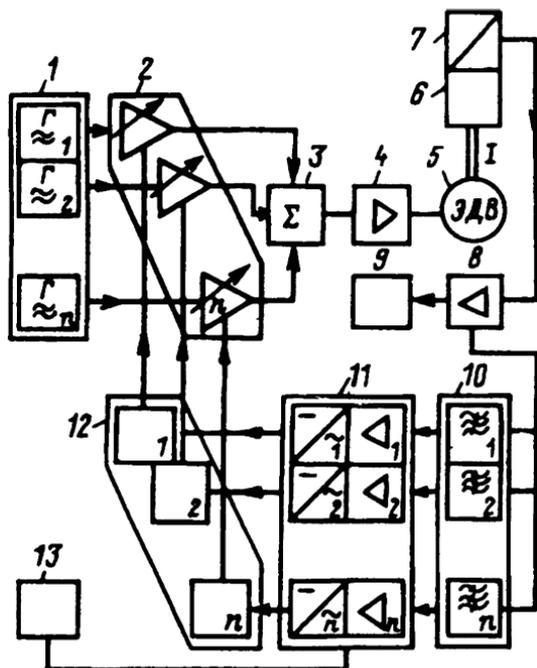


Рис.2.23. Схема вибростенда для испытаний полигармонической вибрацией:
 1 - генераторы электрических гармонических колебаний с регулированием частоты и амплитуды сигнала; 2 - усилители с управляемым коэффициентом передачи; 3 - сумматор; 4 - усилитель мощности; 5 - вибровозбудитель; 6 - испытуемый объект; 7 - датчик вибрации; 8 - усилитель; 9 - регистрирующая аппаратура; 10 - перестраиваемые полосовые фильтры; 11 - усилители и детекторы; 12 - блоки управления для поддержания заданного уровня вибрации; 13 - регистрирующая аппаратура

На рис. 2.23 показана принципиальная схема вибростенда, который обеспечивает поддержание на определенном уровне нескольких гармоник одновременно в заданной точке испытуемого объекта. Это осуществляется замкнутой системой управления, содержащей датчик 7, усилитель 8, набор анализирующих и управляющих блоков параллель-

ного действия. Отработка i -й гармоники измеряемого параметра осуществляется регулятором в каждом параллельном канале. Выходные сигналы регуляторов суммируются в сумматоре Σ и подаются на усилитель мощности 4, питающий вибровозбудитель.

Программирование испытаний на виброустойчивость при воздействии полигармонической вибрации включает спектральный анализ вибрации испытуемого объекта в эксплуатационном режиме. По результатам анализа составляют таблицу частот с выделением основной частоты спектра и ряда гармоник с соответствующими им виброперемещениями, виброскоростями или виброускорениями, присущими определенным точкам испытуемого объекта. Руководствуясь допускаемыми нормами воздействия на испытуемый объект, назначают время испытаний и интенсивность воздействия внешней силы на каждой из выбранных гармонических составляющих. Отработку программы производят на макете объекта, внося соответствующие коррективы. Эта мера позволяет предотвратить выход объекта из строя в процессе отладки программы.

При испытаниях на вибропрочность спектральный состав возбуждения может быть установлен по результатам анализа реальной вибрации. В этом случае интенсивность воздействия можно устанавливать по виброускорению явно выраженных масс испытуемого объекта или по приложенному к нему переменному усилию.

Испытание случайной вибрацией

Исследования реальных вибраций различных ЛА показали, что вибрации являются случайными функциями времени. Их статистические характеристики определяются в результате обработки записей реальной вибрации. Целью испытаний является воспроизведение на вибростенде вибрации с заданными статистическими характеристиками в контрольных точках испытуемого объекта. Поскольку в качестве заданных статистических характеристик используются результаты обработки натурной вибрации, испытания случайной вибрацией наиболее точно воспроизводят реальное вибрационное состояние испытуемого изделия.

При организации испытания случайной вибрацией принимают две гипотезы:

- 1) о нормальности закона распределения случайных вибраций;
- 2) о локальной стационарности случайных вибраций.

Обоснование первой гипотезы заключается в том, что вибрационное состояние изделия можно рассматривать как суперпозицию различных случайных процессов, порождаемых статистически независимыми источниками. Следует учесть также, что если вибродатчик рас-

положен в таком месте конструкции, где проявляются ее фильтрующие свойства, то закон распределения выходного сигнала этого датчика приближается к нормальному.

Вторая гипотеза предполагает, что статистические характеристики вибрации изменяются достаточно медленно во времени. Это позволяет считать, что некоторые усредненные характеристики, вычисленные в определенном временном интервале, дают адекватное описание вибрационного состояния на этом отрезке времени.

Свойства вибрации как стационарного централизованного нормального процесса полностью определяются в общем случае ковариационной матрицей или ее преобразованием Фурье — матрицей спектральных плотностей. В частотном (скалярном) случае процесс характеризуется корреляционной функцией или спектральной плотностью. Поскольку испытуемые конструкции являются многорезонансными динамическими системами с ярко выраженными частотно-избирательными свойствами, спектральные характеристики (собственные и взаимные спектры) наиболее наглядны и имеют определяющее значение для инженера-испытателя. Режим испытаний случайной вибрацией определяется спектральной плотностью виброускорения, контролируемого в одной точке и в одном направлении, или матрицей спектральных плотностей при анализе векторной вибрации.

Вибрационные испытания в широкой полосе охватывают обычно частотный диапазон в одну-две декады. Случайная узкополосная вибрация возбуждается и исследуется в полосе единиц или десятков герц.

Испытание широкополосной случайной вибрацией. Широкополосные случайные процессы с заданным энергетическим спектром получили широкое распространение в качестве физических моделей реальных вибропроцессов. Описание моделей реальных вибропроцессов в рамках корреляционной теории позволяет характеризовать эквивалентность воспроизводимых и реальных вибраций степенью близости их энергетических спектров. При этом тракт воспроизведения вибрации виброиспытательного комплекса должен обеспечивать воспроизведение в контролируемой точке или в совокупности контролируемых точек исследуемого объекта механических колебаний с требуемым энергетическим спектром.

Этот метод испытаний предусматривает одновременное возбуждение всех резонансных частот объекта. Схема установки для испытания широкополосной случайной вибрацией приведена на рис. 2.24.

Правильному воспроизведению вибрации препятствует искажающее влияние средства возбуждения вибрации. Поэтому перед испытаниями необходимо скорректировать или выровнять амплитудно-частотную характеристику вибростенда. При испытаниях в контрольных точках изделия возбуждаются стационарные случайные

вибрации. Их числовые характеристики должны быть близки к заданым, которые определяют по результатам натурных испытаний.

Метод испытания широкополосной случайной вибрацией позволяет воспроизвести те числовые вибрационные характеристики условий эксплуатации, которые влияют на надежность испытуемого изделия. За критерий подобия принята спектральная плотность вибрационных ускорений, так как вероятность выхода изделия из строя или нарушения режима его работы возрастает с повышением уровня спектральной плотности вибрации.

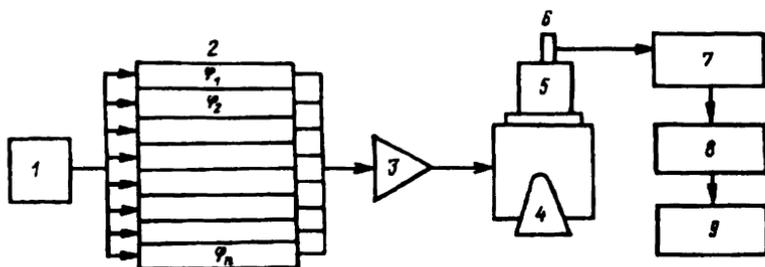


Рис. 2.24. Схема установки для испытания широкополосной случайной вибрацией:

- 1 - генератор шума; 2 - блок фильтров; 3 - усилитель мощности; 4 - вибровозбудитель; 5 - испытуемое изделие; 6 - виброизмерительный преобразователь; 7 - виброизмерительная аппаратура; 8 - анализирующее устройство; 9 - регистрирующая аппаратура

Программу испытаний задают в виде графика зависимости спектральной плотности от полос частоты, в которых проводили эти измерения. Эта программа воспроизводится вибростендом в контрольной точке изделия с помощью формирователей энергетического спектра, которые в общем случае представляют собой источник широкополосного случайного сигнала или белого шума и набор регулируемых полосовых фильтров.

Испытание узкополосной случайной вибрацией. Режим меняющейся узкополосной случайной вибрации является промежуточным между режимом широкополосной случайной вибрации и режимом с изменяющимся синусоидальным сигналом. Метод основан на замене возбуждения широкополосной плотности малого ускорения возбуждением узкополосной плотности большого ускорения, медленно изменяющейся на некотором участке частотного диапазона.

При правильной регулировке метод обеспечивает то же число наиболее важных ускорений на заданном уровне, что и метод широкопо-

лосной вибрации. Для воспроизведения условий резонанса и нагружения испытуемого образца узкополосная вибрация должна обладать теми же характеристиками, что и широкополосная. Необходимо также, чтобы число изменений знака ускорения для любого увеличения уровня напряжения было тем же.

Этот метод имеет следующие преимущества:

1) возможность получения значительных уровней нагрузки с помощью менее мощного оборудования;

2) возможность применения более простой аппаратуры управления и, следовательно, использования менее квалифицированного персонала.

Основными задачами являются определение закона изменения средней частоты во времени и закона изменения вибрации в зависимости от частоты. При определении этих законов основываются на эквивалентности испытаний узко- и широкополосной случайной вибрацией. Такая эквивалентность, например, установлена при испытаниях на усталостную прочность, при которых требуется идентичность распределения максимумов и минимумов нагрузки при узко- и широкополосной вибрации. Идентичность имеет место в том случае, когда средняя частота f изменяется по логарифмическому закону, а среднеквадратичное значение виброускорения пропорционально квадратному корню частоты \sqrt{f} . Для удобства назначения режима испытаний вводят параметр γ , который называется градиентом ускорения:

$$\gamma = \frac{\sigma_y}{\sqrt{2\pi f}}, \quad (2.51)$$

где σ_y — среднеквадратичное значение виброперегрузки (по ускорению в единицах $g = 9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$) при узкополосном возбуждении. Если σ_y должно быть пропорционально \sqrt{f} , то градиент ускорения при испытаниях на узкополосную вибрацию — постоянная величина.

Время испытаний при логарифмическом изменении частоты определяется как

$$t_y = 20 \rho t_{\text{ш}} \ln \frac{f_{\text{в}}}{f_{\text{н}}}, \quad (2.52)$$

где t_y и $t_{\text{ш}}$ — время проведения испытаний при узко- и широкополосной вибрации; ρ — масштабный коэффициент; $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ — соответственно высшая и низшая частоты диапазона, в котором производится сканирование. Для воспроизведения условий широкополосной вибрации с равномерной спектральной плотностью S_0 в полосе частот $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ (рис. 2.25) градиент ускорения вычисляется по формуле

$$\gamma = q \sqrt{\frac{S_0}{4k_{cp}}}, \quad (2.53)$$

где k_{cp} — средний коэффициент передачи вибросистемы;

$$k_{cp} = \frac{1}{\omega_b - \omega_n} \int_{\omega_n}^{\omega_b} |H_0(j\omega)| d\omega;$$

$H_0(\rho)$ — ее передаточная функция.

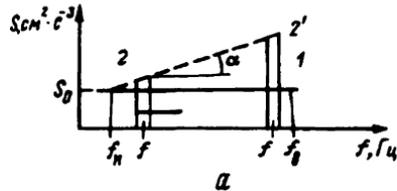
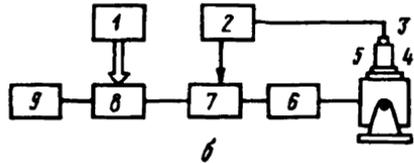


Рис. 2.25. Спектральные плотности узкополосной и широкополосной вибрации (а) и схема установки (б):

- 1 — привод сканирования частоты;
- 2 — виброметрическая аппаратура;
- 3 — датчик; 4 — испытуемое изделие;
- 5 — вибровозбудитель; 6 — усилитель мощности;
- 7 — автоматический регулятор усиления; 8 — сопровождающий фильтр; 9 — генератор белого шума



Из выражений (2.52) и (2.53) видно, что режим испытания узкополосной вибрацией определяется коэффициентами ρ и q . Коэффициент q может изменяться от 1,14 (при простых испытаниях) до 3,3 (при коренных испытаниях).

Коэффициент ρ изменяется соответственно в пределах 0,65 — 0,025.

На рис. 2.25,а показаны спектральные плотности узкополосных и широкополосных вибраций. Наклон штриховой линии ($\operatorname{tg} \alpha$), определяющий скорость нарастания спектральной плотности при изменении средней частоты f , равен квадрату градиента ускорения.

Важной особенностью таких испытаний является возможность автоматического регулирования уровня вибрационных нагрузок (рис. 2.25,б).

Узкополосный случайный процесс с переменной по времени центральной частотой f получается с помощью генератора белого шума и сопровождающего фильтра, центральная частота которого изменяется приводом сканирования частоты (ПСЧ). Скорость вращения ПСЧ ре-

гулируется в широких пределах. Среднеквадратичное значение узкополосных вибраций на выходе вибросистемы стабилизируется с помощью системы автоматической регулировки усиления (АРУ). Сигнал обратной связи АРУ поступает с выхода виброметрической аппаратуры (ВА).

Приращению среднеквадратичного значения сигнала, пропорциональному \sqrt{f} , соответствует в логарифмическом масштабе наклон 3 дБ на октаву. Поэтому на выходе ВА (перед входом АРУ) включается фильтр, имеющий затухание 3 дБ на октаву. Это и обеспечивает постоянство градиента ускорения при сканировании средней частоты.

Испытание реальной вибрацией

Под испытанием реальной вибрацией понимают воспроизведение на выходе вибросистемы, состоящей из вибростенда и испытуемого изделия, мгновенных значений параметров вибропроцессов, записанных в натуральных условиях на один из носителей информации. Такие испытания проводят, когда при нормальной эксплуатации на исследуемую конструкцию воздействуют существенно нестационарные процессы, которые не удовлетворяют гипотезе локальной стационарности. Схема установки для испытания реальной вибрацией представлена на рис. 2.26.

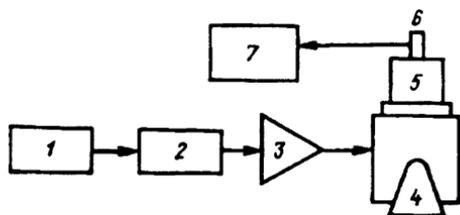


Рис. 2.26. Схема установки для испытания реальной вибрацией:
 1 — магнитофон; 2 — корректирующее устройство; 3 — усилитель мощности; 4 — вибровозбудитель; 5 — испытуемое изделие; 6 — виброизмерительный преобразователь; 7 — анализирующее и регистрирующее устройство

Способы воспроизведения широкополосной случайной вибрации в данном случае оказываются неприемлемыми.

Анализируя методы испытания случайной и реальной вибрацией, применяемые при наземной обработке ЛА, можно сформулировать рекомендации по их выбору:

1. Если испытываемые конструкции являются простейшими колебательными системами с одной степенью свободы или вынуждающие воздействия в натуральных условиях являются узкополосным случайным процессом со значительной мощностью, сосредоточенной в окрестности некоторой центральной частоты, то достаточно провести испытания на узкополосную случайную вибрацию.

2. При широкополосном возбуждении сложных механических конструкций с большим числом степеней свободы необходимо проводить испытание широкополосной случайной вибрацией. Если в данной конструкции возможны сложные пространственные движения, то для наилучшего приближения условий эксперимента к натурным следует воспроизводить многомерные (векторные) вибрации.

3. Если сложные многорезонансные объекты необходимо испытать в короткий отрезок времени, в течение которого невозможно определить, является вибрация стационарным или нестационарным процессом, следует применять испытание реальной вибрацией.

Средства проведения наземных вибрационных испытаний

Вибрационные испытания ЛА и их элементов осуществляются с помощью специального оборудования. В состав этого оборудования входят:

- стенды, имитирующие механические воздействия;
- приспособления для крепления ЛА или его элементов к испытательным установкам;
- приборы для измерения параметров вибрации.

Современные вибрационные установки дают возможность изменять амплитуды колебаний в процессе испытаний, управлять установкой автоматически, проводить испытания различными методами. В настоящее время ведутся разработки оборудования, которое позволит проводить испытания изделий на воздействие не только гармонических, но и полигармонических колебаний в условиях, близких к реальным.

Можно отметить следующие тенденции совершенствования вибростендов:

- расширение рабочих диапазонов частот и толкающих усилий;
- снижение уровня внешних полей, магнитного и вибрационного шума;
- автоматизация процессов испытания и измерения параметров вибраций;
- создание оборудования для испытаний изделий на вибрационные воздействия совместно с влияющими факторами (тепло, холод, вакуум, давление, влажность, нормальные ускорения);
- создание образцовых вибрационных установок, предназначенных для проверки и градуировки виброизмерительных приборов.

Вибростенды для испытаний ЛА и их элементов можно классифицировать по назначению, исполнению, типу и направлению создаваемых колебаний, числу компонент и форме колебаний, принципу рабо-

ты возбудителя, динамической схеме и принципу возбуждения переменной силы в возбудителе колебаний.

1. По назначению:

— вибростенды для испытаний на вибропрочность и вибронадежность;

— вибростенды для испытаний на усталость и выносливость образцов материалов, деталей и агрегатов;

— вибростенды для градуировки, калибровки и проверки виброизмерительной аппаратуры.

2. По исполнению:

— переносные вибростенды для нормальных и специфических условий эксплуатации;

— стационарные вибростенды с одним или несколькими возбудителями колебаний.

3. По типу создаваемых механических колебаний:

— вибростенды прямолинейных колебаний;

— вибростенды крутильных колебаний.

4. По направлению действия механических колебаний:

— вибростенды, создающие колебания вдоль или вокруг вертикальной оси;

— вибростенды с переменным углом установки направления создаваемых колебаний по отношению к горизонтальной плоскости.

5. По числу компонент механических колебаний:

— вибростенды однокомпонентные для создания прямолинейных и крутильных колебаний;

— вибростенды многокомпонентные для создания плоскостных и объемных колебаний.

6. По форме создаваемых механических колебаний:

— вибростенды для создания гармонических или квазигармонических колебаний;

— вибростенды для создания полигармонических колебаний;

— вибростенды для создания колебаний широкого спектра частот.

7. По принципу работы возбудителя механических колебаний:

— нерезонансные вибростенды;

— резонансные вибростенды с внешним возбуждением и с автоколебанием.

8. По динамической схеме:

— вибростенды с кинематическим ограничением смещения стола;

— вибростенды с кинематически неограниченным прямым возбуждением колебательного смещения стола;

— вибростенды с кинематически неограниченным косвенным возбуждением колебательного смещения стола.

9. По принципу возбуждения переменной силы в возбудителе колебаний (по виду энергетического привода):

- механические;
- электрогидравлические;
- пьезоэлектрические;
- электромагнитные;
- резонансные;
- пневматические;
- магнитострикционные;
- электродинамические.

Механические вибростенды

Механические вибростенды обычно выполняют с вибровозбудителями следующего типа: центробежными, эксцентриковыми, кривошипно-шатунными с жесткой связью, с гибкой связью, кулисными и маятниковыми.

Основное преимущество данных вибростендов заключается в том, что они обеспечивают с определенной точностью постоянство амплитуды вибрации при частотах до 400 Гц. Грузоподъемность промышленных стендов может достигать значений до 1000 кг.

Все механические стенды — низкочастотные, частота ограничена прочностью звеньев передаточного механизма. Многозвенный механизм таких стендов имеет большое количество резонансных частот, оказывающих влияние на режим испытания объектов.

В качестве примера рассмотрим схемы работы механических вибростендов с эксцентриковым и центробежным вибратором.

Стенд с эксцентриковым вибровозбудителем (рис. 2.27, а) достаточно прост, но из-за сильной изнашиваемости подшипников стенды, выполненные по такой схеме, применяют для частот, не превышающих 50 — 60 Гц. Амплитуду вибрации регулируют изменением эксцентри-

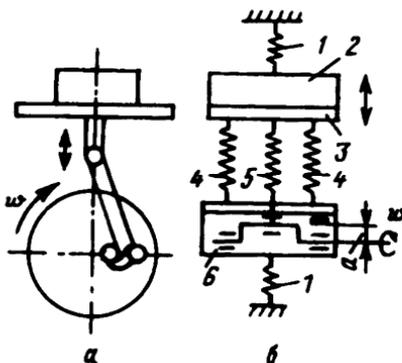


Рис 2.27. Схема механического вибростенда с эксцентриковым вибровозбудителем:

- а — возбудитель с эксцентриковым приводом;
- б — возбудитель с упругими элементами реактивной массы

ситета, частоту — изменением частоты вращения двигателя. Основные преимущества таких стенов — возможность получения очень низких частот, независимость амплитуды от частоты и экономичность.

Недостатком является невозможность получения высоких частот и малых амплитуд (менее 0,1 мм).

Для разгрузки подшипников применяются эксцентрикые стенов, включающие упругие элементы и реактивную массу (рис. 2.27, б). Реактивная масса 2 служит для управления вибрационными силами, действующими на основание. Пружины 1 являются основными. Через упругий элемент 5 осуществляется передача колебаний от эксцентрика б с постоянным эксцентриситетом a к платформе 3. Пружины 4 служат для связи элементов вибростенда с основанием. Изменением длины рабочих пружин регулируется амплитуда вибрации платформы.

Колебательную систему стенов с центробежными вибраторами (рис. 2.28, а) составляют пружина 4 и подвижная часть стенов, состоящая из платформы 1 с испытуемым объектом, штока 2 и собственно вибратора 3. В вибратор входят два вращающихся в разные стороны параллельных вала, на которых находятся два стальных сектора (рис. 2.28, б).

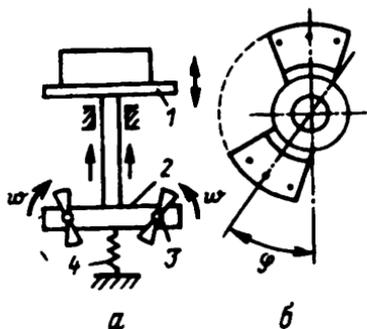


Рис. 2.28. Схема механического вибростенда с центробежным вибровозбудителем:
а — вибровозбудитель с центробежным приводом; б — несбалансированные сектора

Радиальные оси симметрии секторов в каждой из четырех пар можно сдвинуть относительно друг друга. Тем самым достигается некоторая неуравновешенность, вследствие которой при вращении возникают центробежные силы. Составляющие центробежных сил в направлении, перпендикулярном продольной оси штока, взаимно уничтожаются, а в направлении, совпадающем с продольной осью штока, — складываются, вызывая прямолинейную синусоидальную вибрацию подвижной части стенов, подвешенной на пружине 4 (см. рис. 2.28, б). Амплитуда вибрации регулируется изменением угла между секторами. Частота вибрации, равная частоте вращения вала, регулируется пусковым реостатом.

Электрогидравлические вибростенды

Характерными особенностями электрогидравлических вибростендов является возможность:

- 1) создания больших переменных сил (свыше 10^6 Н);
- 2) проведения испытаний при частотах до 100 Гц и в отдельных случаях — при частотах до 500 Гц;
- 3) получения больших амплитуд перемещения при испытаниях на низких частотах.

В зависимости от типа задающего механизма различают стенды:

- а) с гидромеханическим возбуждением;
- б) с гидроэлектромагнитным возбуждением;
- в) с гидроэлектродинамическим возбуждением.

Наиболее совершенными являются стенды с гидроэлектродинамическим возбуждением вибрации, в которых электродинамический возбудитель приводит в движение золотник или клапан системы управления, изменяющий давление в основной гидравлической системе. Однако воздействие сложных динамических процессов в жидкости затрудняет получение заданного закона колебаний. Многоступенчатое усиление позволяет получать на столе стенда силы до 10^4 — 10^5 Н. Верхний предел частотного диапазона ограничивается динамическими свойствами жидкости и составляет 200 — 300 Гц.

Рассмотрим принципиальную схему работы электродинамического вибрационного стенда (рис. 2.29). Возбудитель вибрации 1 малой мощности жестко связан с управляющим золотником 2 четырехкромочного типа. Золотник 3 гидравлического усилителя перемещается при изменении давления p_y , действующего на торцевые плоскости золотника.

Во втором каскаде гидравлического усилителя применен поршень 4 дифференциального типа с отношением рабочих площадей 1 : 2. При движении золотника 3 нижняя полость гидроцилиндра попеременно сообщается с полостью высокого давления p_0 или со сливной ветвью гидросистемы.

Прямолинейное движение стола обеспечивается специальными центрирующими поясками на штоке, соединенном с поршнем. Обратные связи осуществля-

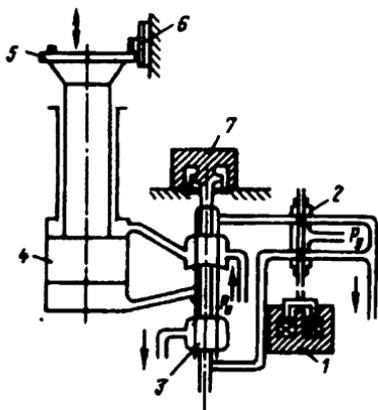


Рис. 2.29. Схема электрогидравлического вибростенда

ются с помощью датчиков ускорения 5 и датчиков скорости 7. Среднее положение стола контролируется с помощью датчика 6 потенциометрического типа.

Пьезоэлектрические вибростенды

Проведение испытаний приборов и датчиков при частотах свыше 10 000 Гц возможно с использованием пьезоэлектрических вибростендов.

Важнейшие особенности вибростендов с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации следующие:

- амплитуды перемещения в плоскости крепления испытуемого прибора составляют обычно доли микрометра;
- допускаемая полезная нагрузка мала, а вынуждающая сила только в некоторых конструкциях достигает 10 Н;
- частотный диапазон испытаний составляет 1 — 20 кГц;
- в зоне испытаний отсутствует магнитное поле.

Стенды с пьезоэлектрическим возбуждением вибрации предназначены в основном для точных приборов. Работа таких стендов основана на способности пьезокристалла испытывать деформацию под действием приложенного к нему электрического напряжения. Изменение направления вектора напряженности внешнего поля на противоположное меняет деформацию сжатия на деформацию растяжения (и наоборот). Если напряжение будет синусоидальным, то и деформация также будет происходить по синусоидальному закону.

На рис. 2.30 приведена принципиальная схема пьезоэлектрического стенда, состоящего из нескольких десятков колец 3, изготовленных из титаната бария и склеенных между собой в столбик, закрепленный в специальном зажиме 5. Кольца поляризованы в осевом направлении. К кольцам через усилитель подводят напряжение от генератора 4. К плоскостям столбика приклеены платформы 1 для крепления испытуемых приборов или датчиков 2.

Первая собственная частота продольных колебаний пьезоэлектрического стержня весьма велика (до 50 кГц), и испытания обычно проводят в дорезонансном режиме. Стенды, предназначенные для испытаний в резонансном режиме, позволяют получать ускорения с амплитудами до 250 м/с^2 .

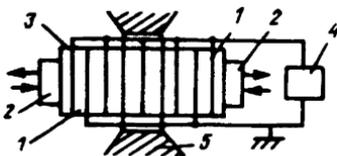


Рис. 2.30. Схема пьезоэлектрического вибростенда

Электромагнитные вибростенды

Вибростенды с электромагнитным возбуждением имеют следующие особенности:

— испытания проводятся на фиксированных частотах 50 и 100 Гц; в отдельных конструкциях возможны испытания с переменными частотами от 15 до 500 Гц;

— возможно проведение испытаний на резонансных режимах с переналадкой механической части стенда;

— получаются значительные вынуждающие силы (до $5 \cdot 10^4$ кН);

— невозможно воспроизвести вибрации по заданной программе (вибрация близка к гармонической только при резонансных режимах);

— конструкция стенда и системы управления относительно проста;

— стенды устойчивы к воздействию внешней среды;

— практически отсутствуют магнитные поля в зоне проведения испытаний.

В практике применяются две основные схемы работы стендов:

1) с подмагничиванием постоянным током;

2) без подмагничивания.

В первом случае можно получить режим с частотой, равной частоте переменного тока; во втором случае частота колебаний вибростенда удваивается.

На рис. 2.31 представлена схема вибростенда с одним электромагнитом для испытания вибрацией, возбуждаемой в вертикальном направлении при работе в резонансных режимах. Электромагнит 1, установленный на упругом основании 2, взаимодействует с подвижной системой стенда; она состоит из стола с изделием 3 и упругих элементов 4. Настройка на резонанс осуществляется изменением длины элемента 4 путем перестановки опор или изменением массы стола с по-

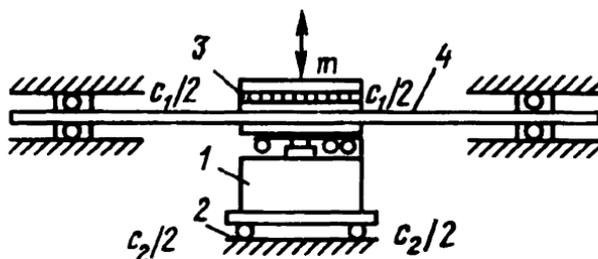


Рис. 2.31. Схема электромагнитного вибростенда с одним электромагнитом

мощью дополнительных грузов. Возможна также замена упругих элементов. На стенде проводят испытания в диапазоне частот от 60 до 300 Гц.

Максимальная вынуждающая сила при частотах до 150 Гц составляет до 10^5 Н при кратковременной работе; максимальная масса испытуемого изделия до 20 кг.

Резонансные (камертонные) вибростенды

Для получения высоких значений ускорений применяют стенды с резонансными возбудителями колебаний. Такие возбудители представляют собой балку или камертон, колебания которых с резонансной частотой поддерживаются специальным электромагнитным устройством.

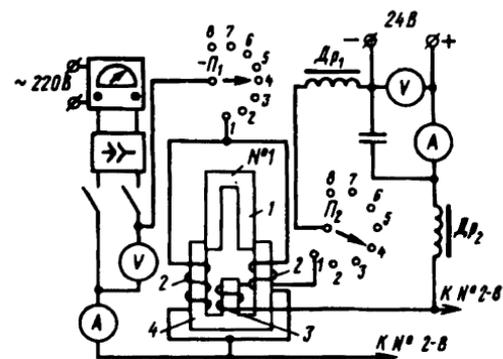


Рис. 2.32. Схема резонансного (камертонного) вибростенда

Стенд (рис. 2.32) состоит из восьми специальных камертонов, имеющих собственные частоты от 200 до 3000 Гц. Концы обеих ветвей каждого камертона 1 (на схеме изображен только один камертон №1) помещены в магнитное поле торцевой системы возбуждения, состоящей из двух звуковых катушек 2 и катушки подмагничивания 3, установленных на Ш-образном сердечнике 4. При питании катушки подмагничивания постоянным током, а звуковых катушек — переменным

током от звукового генератора сила, образующаяся при взаимодействии магнитных полей, заставляет ветви камертона колебаться с частотой переменного тока. В момент резонанса амплитуда колебаний достигает максимума. Одинаковые испытуемые приборы симметрично крепятся на концах ветвей камертона.

Пневматические вибростенды

Вибростенды, использующие энергию сжатого воздуха, имеют следующие преимущества:

- возможность работы во взрывоопасных условиях;

- относительно несложное регулирование амплитуды и частоты вибрации с помощью простой дроссельной установки;
- широкий диапазон возможных частот (верхний предел 500 — 800 Гц);
- широкий диапазон изменения амплитуд и сил.

Для работы таких стендов используют промышленные пневмосистемы с давлением $(2 - 7) \cdot 10^5$ Па.

По принципу действия различают вибровозбудители:

1) с пульсатором; применяют их при сравнительно низких частотах (до 15 Гц), значительных амплитудах (до 20—30 мм) и значительной развиваемой силе;

2) автоколебательные; примерный диапазон частот 15—60 Гц; можно создать достаточно большие амплитуды и силы;

3) центробежные; применяют при частотах 20—400 Гц;

4) использующие автоколебательные процессы в потоке сжатого воздуха; достигаются большие частоты (до 2000 Гц), но амплитуды небольшие (до 0,2 мм).

Преобразование пульсирующего давления в переменную силу реализуют следующие устройства: пневмокамеры; поршень-цилиндр; мембраны; элементы из высокоэластичного материала.

В качестве примера рассмотрим вибровозбудители с использованием мембраны (рис. 2.33).

Мембраны изготавливают главным образом из резиноканевых материалов. У металлических мембран делают гофры специального профиля. Для возвращения мембраны в исходное положение служат дополнительные пружины 5. Мембрана 1 соединена со штоком 2 с помощью металлических фланцев 3 и 4.

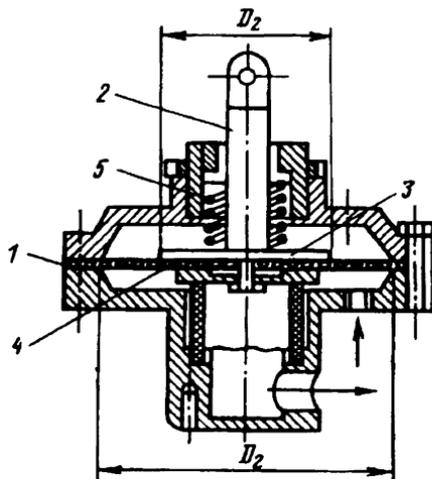


Рис. 2.33. Схема вибровозбудителя с пульсатором

Магнитострикционные вибростенды

Принцип действия магнитострикционных вибраторов основан на изменении размеров ферромагнитного тела при внесении его в магнитное поле.

Принципиальная схема механической части стенда (рис. 2.34) состоит из трех основных частей: магнестрикционного вибратора 1, концентратора 2, помещенных в жидкости 8, 11, и испытуемого образца 3. Собственная частота продольных колебаний всех этих деталей одинакова и равна рабочей частоте стенда. Вибратор, концентратор и образец являются полуволновыми элементами, и при жестком соединении их образуется система, хорошо резонирующая на третьем тоне (третьей гармонике) продольных колебаний.

Возбудителем этих колебаний является вибратор 1, использующий явление магнестрикции, суть которого состоит в изменении линейных размеров магнестрикционного стержня, помещенного в магнитное поле, в соответствии с изменениями этого поля.

Для создания переменного магнитного поля в стержнях вибратора к его обмоткам подводится переменный ток, частота которого равна рабочей частоте установки. При этом вибратор работает в резонансном режиме. Амплитуда колебаний максимальна на его торцах (здесь пучность смещений) и равна нулю посередине (здесь узел). Мощность, снимаемая с вибратора, тем больше, чем больше амплитуда его колебаний и площадь торца. Чтобы эффективно передать эту мощность на образец, у которого площадь торца значительно меньше площади торца вибратора, необходимо применить согласующий стержень — концентратор 2.

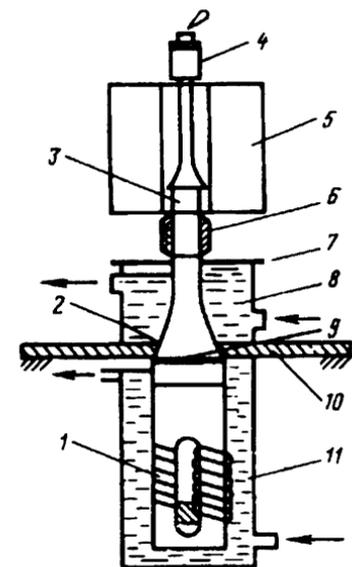


Рис. 2.34. Схема магнестрикционного стенда

Концентратор является полуволновым стержнем переменного сечения, расположенного в корпусе 7, пучности смещений находятся на его торцах; узловое сечение концентратора (где имеется фланец 9) используется для крепления его (и всей системы) на опорной плите 10.

Условия передачи концентратором колебательной энергии от вибратора к образцу определяются отношением площадей его торцов, формой образующей и материалом концентратора. На тонком конце сужающегося концентратора происходит концентрация энергии, проявляющаяся в том, что амплитуда колебаний торца с малой площадью значительно превосходит амплитуду колебаний торца вибратора, так как вибратор жестко соединен с концентратором. Таким образом, концентратор является своеобразным усилителем амплитуды колебаний вибратора.

Образец жестко закрепляется на торце концентратора при помощи резьбового соединения б. Так как собственная частота продольных колебаний образца равна частоте колебаний системы вибратор — концентратор, легко устанавливается резонансный режим колебаний, и при этом в материале образца развиваются значительные механические напряжения, достигающие предела выносливости или превосходящие его в зависимости от мощности, подводимой к вибратору. Максимум этих напряжений находится в узле колебаний (пучность деформаций), расположенном в средней (по длине) части образца. Измеряя амплитуду колебаний торца образца датчиком 4, можно рассчитать напряжения в опасном сечении образца. Вспомогательный узел 5 обеспечивает тот или иной тепловой режим или среду во время испытаний образца. Необходимая частота и амплитуда колебаний образца поддерживаются специальными электронными устройствами.

Чаще всего магнитострикционные вибраторы применяются в резонансном режиме, когда частота возбуждающего поля равна собственной частоте упругих колебаний сердечника.

Магнитострикционные вибраторы используются в автоколебательных системах с вынужденным режимом работы для испытаний на высоких частотах (30 кГц и выше) небольших деталей и образцов материалов, когда требуется возбуждать небольшие усилия при малых перемещениях, составляющих доли миллиметра.

Электродинамические вибростенды

Электродинамические вибростенды применяются в тех случаях, когда при вибрационных испытаниях необходимо обеспечить следующие условия:

- большие амплитуды вынуждающей силы;
- широкий частотный диапазон;
- слабые магнитные поля в зоне испытаний;
- воспроизведение вибрации различного типа (гармонической, случайной, по заданной программе);
- малый коэффициент нелинейных искажений;
- строгую направленность создаваемой вибрации;
- возможность изменения направления вибрации.

Типовая схема электродинамического вибрационного стенда представлена на рис. 2.35.

В корпусе электромагнита 3, выполненного из электротехнической стали, помещается бескаркасная катушка подмагничивания 2.

Корпус электромагнита 3 и кольцо 7 составляют магнитопровод вибратора. Каркас подвижной катушки 8 выполнен из стеклотекстолита. Стол стенда 5 выполнен из магнитного сплава.

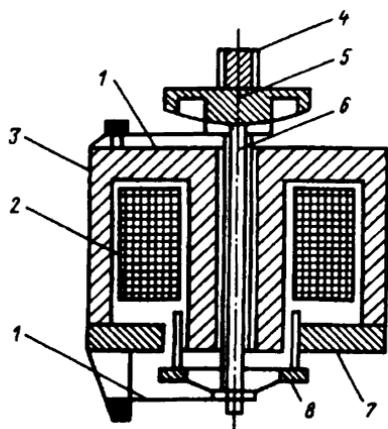


Рис. 2.35. Схема электродинамического вибростенда

Вся подвижная система — катушка 8, шток 6, стол 5 и испытуемое изделие 4 — подвешивается на двух упругих мембранах 1, которые центрируют подвижную катушку и всю систему в воздушном зазоре магнитопровода.

В вибраторе использована электродинамическая приводная система, состоящая из электромагнита с кольцевым воздушным зазором и подвижной системы, подвешенной на двух упругих мембранах.

Электромагнит представляет собой магнитопровод с катушкой подмагничивания, по которой пропускается постоянный ток, создающий постоянное магнитное поле. При пропускании через катушку 8 переменного тока от задающего генератора образуется переменное магнитное поле. В результате взаимодействия постоянного и переменного магнитных полей возникает переменная сила, заставляющая всю подвижную систему совершать колебания в соответствии с направлением этой силы.

Если по обмотке подвижной катушки пропускать синусоидальный ток, то колебания стола вибратора будут иметь синусоидальную форму; частота колебаний стола определяется частотой тока в подвижной катушке.

Если по обмотке подвижной катушки пропускать синусоидальный ток, то колебания стола вибратора будут иметь синусоидальную форму; частота колебаний стола определяется частотой тока в подвижной катушке.

Амплитуда виброускорений, создаваемых вибратором, зависит от тока неподвижной катушки и массы испытуемого изделия.

Упругие мембраны подобраны так, чтобы собственная частота колебаний системы, зависящая от упругости мембраны и массы подвижной части вибратора, составляла 20 ± 5 Гц.

Увеличение амплитуды вынуждающей силы, создаваемой стендом, — одна из важных задач при разработке новых конструкций.

Для этого используются такие пути:

- увеличение магнитной индукции в рабочем зазоре магнитопровода (применение специальных материалов, рациональные конфигурации магнитопроводов, правильное расположение подвижной обмотки в рабочем зазоре магнитопровода, малый зазор и постоянство магнитного потока);

- увеличение плотности тока в подвижной обмотке (для этого применяют принудительное воздушное или водяное охлаждение подвижной обмотки).

Возможность проведения испытаний ЛА в широком диапазоне частот обеспечивается конструкцией вибростенда и возможностями его системы управления и контроля.

Нижний частотный диапазон определяется жесткостью подвески и массами подвижной системы и объекта. Для понижения этой частоты может быть использована магнитная подвеска, состоящая из дополнительных катушек, которые помещены в магнитное поле рабочего зазора. Однако при этом понижается верхний диапазон частот, так как необходима установка направляющих для центрирования подвижной системы.

Верхний частотный диапазон во многом зависит от первой собственной частоты продольных колебаний подвижной системы. Она определяется величинами и распределением масс подвижной системы и ее жесткостью в продольном направлении.

В комплекс аппаратуры, определяющей работу вибрационного стенда, входят следующие устройства:

- 1) задающий генератор электрических колебаний;
- 2) усилитель мощности;
- 3) согласующий трансформатор;
- 4) автоматический регулятор уровня;
- 5) система узкополосных фильтров;
- 6) вибродатчики;
- 7) виброизмерительная аппаратура;
- 8) магнитофон;
- 9) анализирующая и регистрирующая аппаратура.

Физические свойства вибровозбудителей, применяемых в испытательных стендах, во многом определяют их частотные, силовые и другие характеристики. Поэтому независимо от схемы, конструкции и размеров стенда можно определить область использования стендов с различными вибровозбудителями для заданного вида испытаний.

2.2.3.

Испытания на воздействие инерционных нагрузок

При испытаниях КЛА и их систем инерционные нагрузки моделируют таким образом, чтобы они достаточно точно соответствовали нагрузкам при определенных условиях эксплуатации ЛА. Однако полностью воссоздать условия эксплуатации на стендовом оборудовании практически невозможно, так что речь может идти только о большей или меньшей степени приближения к реальным условиям.

В качестве основных средств испытаний используются центробежные стенды.

Для достижения условий нагружения, максимально приближенных к эксплуатационным, на центробежных стендах используются следующие способы:

— изменение частоты вращения динамической установки с исследуемым ЛА;

— поворот исследуемого ЛА на динамической установке;

— линейные перемещения исследуемого ЛА вдоль одной или нескольких пространственных осей на динамической установке.

Для имитации инерционных нагрузок на центробежном стенде необходимо знать закон изменения во времени перегрузки, воздействующей на ЛА при эксплуатации; проанализировать реальный процесс и преобразовать его в процесс, удобный для воспроизведения на стенде; разработать методику воспроизведения закона с требуемыми характеристиками; выбрать или спроектировать и изготовить центробежный стенд, технические характеристики которого обеспечивают воспроизведение заданного закона изменения перегрузки; выбрать или спроектировать комплекс аппаратуры, обеспечивающий съём, первичное преобразование, обработку и регистрацию измеряемых параметров; разработать методику исследования движения испытуемого ЛА в натуральных условиях по результатам лабораторных испытаний на центробежном стенде.

В программе проведения исследований должна быть приведена информация об испытуемом ЛА и заданном законе изменения воздействия на него перегрузки.

Типы законов должны быть оговорены с указанием фронта нарастания и спада перегрузки, длительности действия, предельных отклонений перегрузки.

При воспроизведении линейных ускорений на центробежном стенде определяющее значение имеют величина перегрузки n , градиент перегрузки s , предельный импульс перегрузки $J_{пр}$ и мера интегрального воздействия M_n .

Число циклов и продолжительность испытания должны быть достаточными для измерения и контроля параметров испытуемого объекта.

Особый интерес для разработчиков блоков и узлов аппаратуры представляют перегрузки, вызванные динамическими факторами.

Для различных объектов форма кривой временного значения изменения перегрузок различна. Законы перегрузок различаются по амплитуде, времени нарастания и другим характеристикам.

Отличительной особенностью перегрузок является сравнительно большая длительность действия, измеряемая обычно от 1с до нескольких десятков секунд. Однако формы импульсов разнообразны, что имеет существенное значение при выборе метода их имитации (рис. 2.36, а—г).

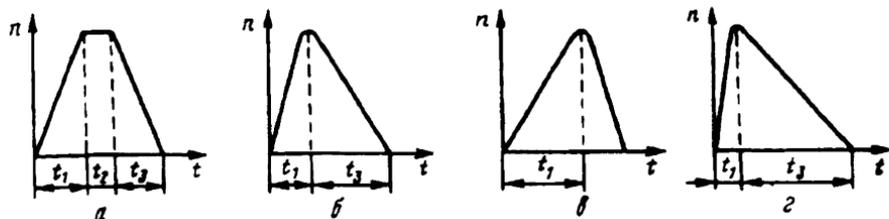


Рис. 2.36. Возможные формы импульсов, воспроизводимых на центрифугах

В основу классификации центрифуг (рис. 2.37) положены следующие эксплуатационные параметры: категория, конструкция, тип привода, нагрузка на плечо, назначение.

При испытаниях ЛА или его элементов на центробежных стендах создаются длительно действующие импульсные перегрузки. Перегрузки создают вращением объекта относительно нескольких пространственных осей. Так как в натуральных условиях динамика движения ЛА и его элементов носит сложный характер, в общем случае центробежные стенды должны обеспечивать изменение частоты вращения планшайбы для воспроизведения переднего фронта нарастания (или уменьшения) перегрузок, поворот испытуемого объекта на планшайбе и линейное перемещение испытуемого объекта по планшайбе (рис. 2.38).

Планшайба вращается вокруг вертикальной оси O_1Y_1 . Платформа имеет сферическую шарнирную опору, позволяющую ей вращаться относительно произвольной оси, проходящей через центр O_2 опоры. Платформа установлена на каретке 4, которая может перемещаться вдоль планшайбы 3. Испытуемый объект 6 может вращаться вокруг своей продольной оси OX .

В процессе испытаний ЛА и их элементов на центробежных стендах воспроизводятся три основных вида перегрузок:

- импульсные;
- сложные непрерывные периодические;
- непериодические ортогональные.

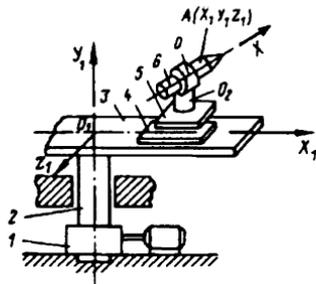
Импульсные перегрузки на испытуемой конструкции можно получить при использовании центрифуг с поворотными платформами; с кареткой, перемещающейся вдоль планшайбы; с ударным приводом планшайбы. Выбор конкретного варианта центрифуги связан с необходимостью воспроизведения перегрузок с определенным временем их нарастания.

Так, например, испытания конструкций на воздействие импульсных перегрузок с крутым фронтом нарастания осуществляются на центрифугах с поворотными платформами. Поворот платформы может быть осуществлен за счет дисбаланса или специальным пневмоцилиндром.



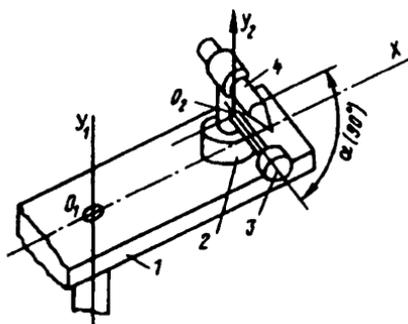
Рис. 2.37. Классификация центрифуг

Рис. 2.38. Схема центробежного стенда:
 1 – редуктор 2 – ротор 3 – планшайба;
 4 – каретка; 5 – платформа;
 6 – испытуемый объект



На рис. 2.39 показана установка поворотной платформы на центрифуге, где дисбаланс в основном создается неуравновешенным грузом 3, укрепленным на поворотной платформе 2. После разгона планшайбы 1 до заданной частоты, когда перегрузка действует нормально к оси чувствительности объекта 4, платформа 2 поворачивается вокруг оси O_2Y_2 на угол 90° за счет дисбаланса от груза 3 с таким расчетом, чтобы ось чувствительности смотрела на ось вращения планшайбы, благодаря чему и обеспечивается действие на объект испытаний заданной перегрузки n . Время разворота платформы с объектом τ , угловая скорость α и угловое ускорение $\dot{\alpha}$ поворота платформы должны соответствовать заданному времени нарастания перегрузки в направлении оси чувствительности устройства.

Рис. 2.39. Схема центробежного стенда с поворотной платформой:
 1 – планшайба; 2 – поворотная платформа;
 3 – неуравновешенный груз; 4 – испытуемый объект



В практике испытаний на центрифугах с поворотными платформами используют параметр поворотной платформы Λ , выраженный в миллиметрах:

$$\Lambda = \frac{J_3 + m_{гр} r^2}{m_3 r}, \quad (2.54)$$

где $J_3 = J_{пл} + J_{об}$ — суммарный момент инерции платформы $J_{пл}$ и объекта $J_{об}$; $m_{гр}$ — масса неуравновешенного груза; r — расстояние от центра тяжести неуравновешенного груза до оси вращения платформы.

Если заданы параметры $n_{X_{max}}$; τ ; α_0 на испытания объекта, то этим уже определен требуемый параметр поворотной платформы Λ :

$$n_{X_{max}} = 3,5 \cdot 10^{-4} C_m \frac{\Lambda}{\tau^2}, \quad (2.55)$$

где C_m — коэффициент, зависящий от начального угла положения α_0 .

Оптимальные значения начальных углов положения неуравновешенного груза находятся в интервале $90^\circ \leq \alpha_0 \leq 120^\circ$. При этих углах можно сократить время разворота платформы и снизить динамические воздействия на стопорящие устройства.

Используя условие воспроизводимости

$$n_{X_{max}} \tau^2 > \frac{t_{таб}^{*2} \cdot J_{об}}{g m_4 r},$$

где $t_{таб}^* = f(\alpha_0)$ — значения безразмерного времени для начального угла α_0 (табл.2.3), можно определить возможность испытания объекта на воздействие заданной перегрузки на центрифугах с поворотными платформами.

Т а б л и ц а 2.3

ЗНАЧЕНИЯ C_m И t^* В ЗАВИСИМОСТИ ОТ α_0

α_0	1°	$22,5^\circ$	45°	$67,5^\circ$	90°	$112,5^\circ$	135°
C_m	0,115	0,590	0,825	1,040	1,000	0,790	0,322
t^*	5,4329	2,4168	2,0400	1,8113	1,8541	2,0820	3,2690

Проведение испытаний на центрифугах с поворотными платформами возможно при выполнении следующих условий:

— момент инерции поворотной платформы должен быть значительно меньше момента инерции испытуемой конструкции;

— неуравновешенный груз должен иметь возможность устанавливаться на различных расстояниях от оси вращения платформы;

— неуравновешенный груз должен иметь возможность устанавливаться под различными начальными углами:

— поворотная платформа должна иметь возможность разворачиваться в двух противоположных направлениях.

Так как в реальных условиях поворотная система состоит из платформы, груза и штока, то формула (2.54) примет вид

$$\Lambda = \frac{J_3 + m_{гр} r_{гр}^2 + m_{ш} r_{ш}^2}{m_{гр} r_{гр} + m_{ш} r_{ш}}, \quad (2.56)$$

где $m_{ш}$ — масса штока; $r_{ш}$ — расстояние от оси вращения платформы до центра масс штока.

При расчете поворотных платформ центрифуг неуравновешенный груз находят по заданному параметру Λ , известным габаритным размерам и моменту инерции платформы и объекта. Для этого намечают расстояния $r_{гр}$, $r_{ш}$ и массу $m_{ш}$. Из уравнения (2.56) получают

$$m_{гр} = \frac{J_3 + m_{ш} r_{ш} (r_{ш} - \Lambda)}{r_{гр} (\Lambda - r_{гр})}. \quad (2.57)$$

Зная $m_{гр}$, выбирают размер груза.

По формуле

$$r_{гр} = \frac{\Lambda}{2} \pm \sqrt{\frac{\Lambda^2}{4} - \frac{J_3^2}{m_{гр}^2} - \frac{m_{ш}}{m_{гр}} r_{ш} (r_{ш} - \Lambda)} \quad (2.58)$$

выбирают минимально возможное значение $r_{гр}$, что позволяет уменьшить динамические нагрузки на планшайбу центрифуги.

Для воспроизведения перегрузок с большим временем нарастания $t \geq 0,2$ с используются центробежные стенды с перемещением испытуемых объектов вдоль планшайбы (рис. 2.40).

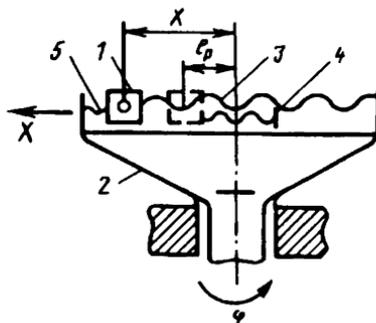


Рис. 2.40. Схема центробежного стенда с перемещающимся испытуемым объектом вдоль планшайбы:

- 1 — объект; 2 — планшайба; 3 — основная пружина; 4 — импульсная пружина;
- 5 — дополнительная пружина

Объект 1 на подвижной каретке устанавливают в центре планшайбы 2. При вращении планшайбы с требуемой угловой скоростью $\varphi = \text{const}$ каретка с объектом перемещается вдоль планшайбы основной 3 и импульсной 4 пружинами. Задача импульсной пружины заключается в разгоне каретки с объектом до скорости V_p , которая необходима для перемещения каретки с объектом на требуемый радиус вращения за время t . Этот разгон осуществляется на длине l_p . Основная пружина предназначена для компенсации всех сил сопротивления и равномерного перемещения объекта по планшайбе. На этом участке импульсная и основная пружины работают в параллельном соединении. Характерный закон нарастания перегрузок, воспроизводимых на стендах с пружинами, показан на рис. 2.41. Должны быть известны следующие параметры стенда: l_k — конечное удаление каретки с конструкцией от оси планшайбы; $\varphi_2 = \omega_3 = \text{const}$ — угловая скорость вращения планшайбы; m_3 — масса каретки с конструкцией. Из рис. 2.41 видно, что кривую нарастания перегрузки можно разбить на три участка.

На участке 1 (участке разгона) ускорение каретки с испытуемой конструкцией изменяется по закону затухающей периодической кривой. На каретку с конструкцией действуют силы: $F_1 = P_0 - c_0 x_1$ — сила пружин (P_0 — суммарная сила начального сжатия импульсной пружины и начального растяжения основной пружины; c_0 — эквивалентный коэффициент жесткости пружин); $F_2 = m_3 \varphi_2^2 \chi_1$ — сила инерции от нормального переносного ускорения;

$F_3 = 2m_3 f \varphi_2 \dot{\chi}_1$ — сила трения от кориолисова ускорения ($f = \text{const}$ — коэффициент трения материалов каретки и направляющих планшайбы).

На участке 2 воспроизводятся перегрузки при равномерном движении каретки с конструкцией.

Воспроизведение участка 3 кривой осуществляется за счет использования дополнительной (буферной) пружины 5 (см. рис. 2.40), которая должна вступить в действие при достижении перегрузки $n_1 = 0,9n_3$. При этом каретка с конструкцией должна находиться на расстоянии l_2 от оси вращения планшайбы:

$$l_2 = \frac{1}{\varphi_2^2} \sqrt{(gn_1)^2 - (2\varphi_2 V_p)^2} .$$

При испытаниях на таких стендах перегрузка нарастает по линейному закону:

$$n = n_0 + \frac{a}{gt} (t - t_1) , \quad (2.59)$$

где n_0 — перегрузка, действующая на конструкцию в тот момент, когда она находится на радиусе l_p и движется со скоростью V_p :

$$n_0 = \frac{1}{g} \sqrt{(l \dot{\varphi}_2^2)^2 + (2 \dot{\varphi}_2 V_p)^2}; \quad V_p = \frac{ag}{\varphi_2^2}. \quad (2.60)$$

Крутой фронт нарастания перегрузок можно осуществить на центрифуге с ударным приводом планшайбы при наличии массивного ротора. Суть работы таких стенов заключается в следующем. Ротор 1 (рис. 2.42) разгоняется до определенной угловой скорости, а далее через передаточное звено 3 толчком приводит в движение планшайбу 2 с испытуемым объектом 4. Для этого на роторе установлены упоры 5, которые при разгоне ротора спущены. В конце взаимодействия передаточного звена с упорами оно опускается, а планшайба продолжает свое движение по инерции или за счет дополнительного электродвигателя. Передаточное звено может быть выполнено в виде упругого элемента, пневматическим, гидравлическим, электродинамическим.

При использовании упругих передаточных звеньев, которыми обычно являются пружины, перегрузки во времени выражаются формулой

$$n^*(t) = \sqrt{\omega^{*2} \sin^2 t^* + (1 - \cos t^*)^4}, \quad (2.61)$$

где $n^* = n_g / \Omega_1$ — относительное значение перегрузки; $\omega^* = \omega / \Omega_1$ — безразмерная собственная частота стенов; ω — собственная круговая частота стенов; Ω_1 — условная угловая скорость вращения системы «ротор — планшайба»; $t^* = \omega t$ — безразмерное время.

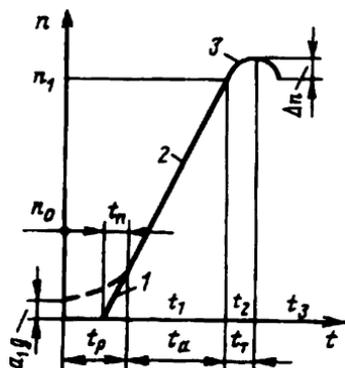


Рис. 2.41. Характерный закон нарастания перегрузок на стенов с пружинами

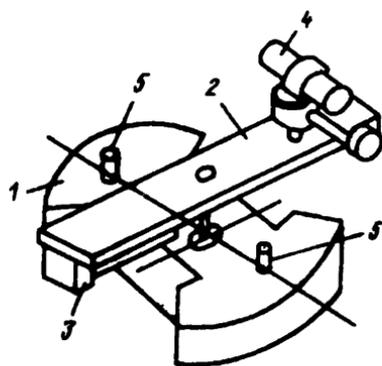


Рис. 2.42. Схема центробежного стенов с ударным приводом:
1 — ротор; 2 — планшайба; 3 — передаточное звено; 4 — объект; 5 — упоры

По формуле (2.61) на рис. 2.43 показаны типичные графики нарастания перегрузок, воспроизводимые на центрифугах при использовании упругого передаточного звена. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

1) если $\omega^{*2} \geq 16$, то кривые перегрузки имеют максимум в интервале $0,5\pi < t^* < 1,92$ и минимум в момент $t^* = \pi$;

2) если $\omega^{*2} \leq 13$, то кривые перегрузки имеют только одну экстремальную точку — максимум при $t^* = \pi$;

3) если $13 < \omega^{*2} < 16$, то кривые перегрузки имеют три экстремума: максимум в интервале $1,74 < t^* < 2,10$; минимум в интервале $2,27 < t^* < 2,62$; максимум в момент $t^* = \pi$.

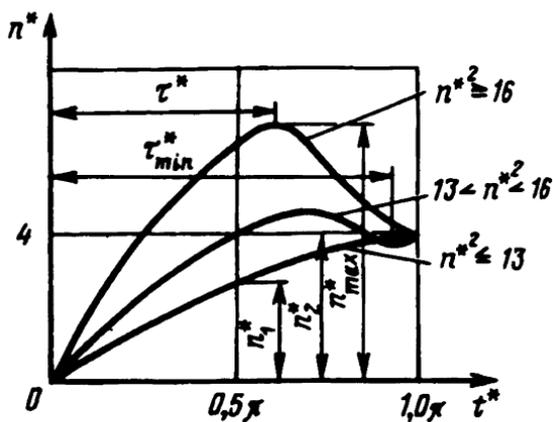


Рис. 2.43. Типичные графики нарастания перегрузок

Если принять, что графики перегрузок имеют экстремальные точки $n_1 = n_{\max}$ в момент времени $\omega t_1 = 0,5\pi$ и n_2 при $\omega t_2 = \pi$, то максимальную перегрузку можно найти по следующей формуле:

$$n_{\max} = \frac{l \Omega_1^2}{g} \sqrt{\omega^{*2} + 1} \approx \frac{l \Omega_1^2}{g} \omega^* . \quad (2.62)$$

Принцип действия гидравлических передаточных звеньев основан на перетекании жидкости из одной полости цилиндра в другую через дроссельное отверстие постоянного или регулируемого сечения (рис. 2.44). Энергия ротора стэнда при взаимодействии с планшайбой затрачивается на сообщение ей заданной скорости враще-

ния и на перемещение жидкости в передаточном звене, которая, в свою очередь, в результате ударного процесса торможения в запоршневом пространстве нагревается. По известному закону изменения ускорения системы «ротор — планшайба»

$$\dot{\varphi}(t) \approx -\frac{Pr + M_{\text{тр}}}{J}, \quad (2.63)$$

где $P = p_{\text{п}}S$ — сила гидравлического сопротивления (S — рабочая площадь поршня; $p_{\text{п}}$ — давление жидкости); $M_{\text{тр}}$ — момент трения (в основном в уплотняющих устройствах гидравлического передаточного звена); r — радиус, на котором расположено гидравлическое передаточное звено от оси вращения планшайбы; J — момент инерции. Подбирают соответствующие параметры стенда и режимы испытаний. Параметры стенда, как правило, известны и не могут изменяться в широких пределах. Поэтому заданный закон изменения перегрузки во времени получают подбором ω_0 и динамической силовой характеристики $P(\alpha_j)$ гидравлического передаточного звена. Требуемая зависимость $P(\alpha_j)$ обеспечивается изменением площади отверстия S_0 .

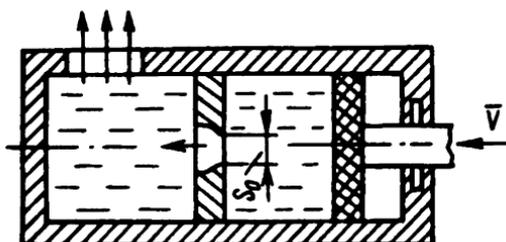


Рис. 2.44. Схема гидравлического передаточного звена

Для испытаний на воздействие сложных непрерывных периодических перегрузок в конструкцию стенда должны быть введены центрифуга и размещенный на ее платформе механизм сферического движения. Сферическое движение состоит из трех составляющих: собственного вращения вокруг продольной оси ЛА, прецессионного и нутационного движения. На рис. 2.45, а, б и в приведены три рекомендуемые схемы такого механизма. Наиболее универсальной схемой, обеспечивающей все режимы, является схема, изображенная на рис. 2.45, б.

Основными элементами стенда (рис. 2.46) являются станина 14, планшайба 11, привод вращения планшайбы, включающий в себя электродвигатель 12 и редуктор 13. На планшайбе установлена опора 4,

имеющая две степени свободы. Привод 3 вращения испытуемой конструкции представляет собой высокоскоростной электродвигатель, на одном конце выходного вала которого установлена оправка 1. В оправку 1 помещается испытуемая конструкция, которая вращается приводом 3 с заданной угловой скоростью $\dot{\varphi}$ вокруг продольной оси, что обеспечивает ускорение, действующее на конструкцию объекта на траектории от собственного вращения ЛА. На приводе 3 размещен привод 5 быстрого конического движения, связанный через кривошип 6 с концом рычажного копирующего механизма 7. Механизм 7 закреплен на стойке 8, размещенной на платформе, и своим вторым концом связан с приводом 16 медленного конического движения через кривошип 15. Таким образом, приводы 5 и 16 через кривошипы 6 и 15 и регулируемый копирующий механизм 7 создают сферическое движение привода 3 и вместе с ним приборного устройства с заданными угловыми скоростями ω_1 и ω_2 , радиусами l и r большого и малого конических движений. Радиусы l и r конических движений могут изменяться регулировкой длин кривошипов 6 и 15. Это приводит к изменению воспроизводимых углов нутации. Угловые скорости ω_1 и ω_2 могут воспроизводиться по заданным законам с помощью приводов 15 и 16.

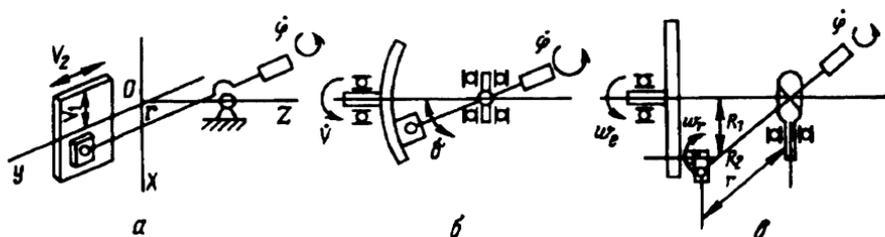


Рис. 2.45. Схемы механизмов сферического движения

В центре масс испытуемой конструкции вследствие вращения планшайбы создается перегрузка, соответствующая перегрузке от поступательного движения ЛА на траектории. Изменением угловой скорости $\dot{\varphi}_2$ воспроизводится необходимый закон изменения этой перегрузки. Получаемые при испытаниях перегрузки измеряются с помощью индуктивных датчиков, располагаемых в соответствующих местах оправки 1. Угловые скорости всех воспроизводимых движений на стенде измеряются датчиками угловых скоростей. Для передачи сигналов и съема информации с датчиков в процессе испытаний служат два бесконтактных передающих устройства 2 и 9. Подача силовых напряжений на электродвигатель 16 и узел 3 осуществляется через контактное токопередающее устройство 10.

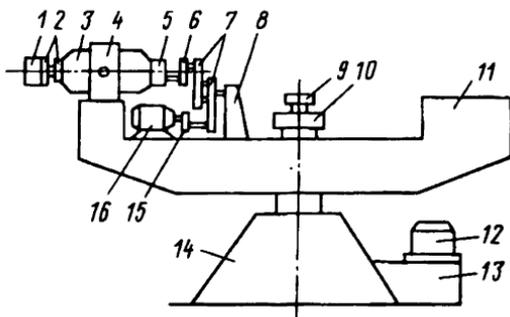


Рис. 2.46. Схема стэнда для воспроизведения непрерывных периодических перегрузок

Используя метод подобия и размерности, установим условия, при которых процессы испытаний объекта на центробежном стэнде будут подобны. При статическом методе испытаний объект жестко крепится на планшайбе на расчетном радиусе от оси ее вращения и остается неподвижным в период испытаний. Частота вращения планшайбы постоянна или медленно изменяется во времени.

Определяющие параметры центробежного стэнда следующие:

w — максимальное центростремительное ускорение; l — расстояние от оси вращения планшайбы до центра масс испытываемого объекта; A — максимальный геометрический размер испытываемого объекта; m — максимальная масса испытываемого объекта; N — номинальная мощность привода планшайбы стэнда; M — масса стэнда; g — ускорение свободного падения.

В соответствии с π -теоремой, из семи параметров, среди которых три имеют независимые размерности, можно составить не более четырех независимых критериев подобия. Учитывая, что $w = clb$, где c — известный безразмерный коэффициент ($\approx 0,01$); b — частота вращения планшайбы, получаем следующие критерии подобия:

$n = w/g$ — перегрузка испытываемого объекта;

$N^* = N/(m l^2 b^3)$ — критерий подобия, пропорциональный коэффициенту сопротивления C_X и определяемый вязкостью воздуха, $N = S C_X \rho V^3 / (2g)$; где ρ — плотность воздуха; V — линейная скорость; S — площадь миделевого сечения; C_X — коэффициент сопротивления; M/m — критерий подобия, показывающий, во сколько раз масса стэнда больше массы испытываемого объекта, и отражающий эффективность использования центробежного стэнда; A/l — критерий, учитывающий неоднородность центробежного силового поля перегрузки в различных точках испытываемого объекта.

Четвертый критерий позволяет дать характеристику относительным отклонениям перегрузок $\bar{\delta}$ в крайних точках объекта (если заданная перегрузка воспроизводится в центре масс):

$$\bar{\delta} = \frac{(l \pm 0,5A) \omega^2}{l \omega^2} = 1 \pm 0,5 \frac{A}{l}.$$

Согласно π -теореме можно представить зависимость между перечисленными критериями подобия:

$$N^* = f\left(n; \frac{M}{m}; \frac{A}{l}\right).$$

Эта функция в общем виде есть уравнение подобия центробежных стендов для статических испытаний объектов.

На рис. 2.47 приведен график зависимости $N^* = f(n)$.

Первый участок кривой ограничивается диапазоном перегрузок $15 \leq n \leq 100$ и описывается уравнением

$$N^* = 4,55 \cdot 10^{-4} n^{-1,88}.$$

Второй участок ограничивается диапазоном $100 < n \leq 1000$. Ему соответствует равенство

$$N^* = 0,2 \cdot 10^{-5}.$$

Перегрузки до 100 единиц обеспечиваются за счет увеличения габаритов стенда, а перегрузки свыше 100 — путем увеличения угловой скорости планшайбы.

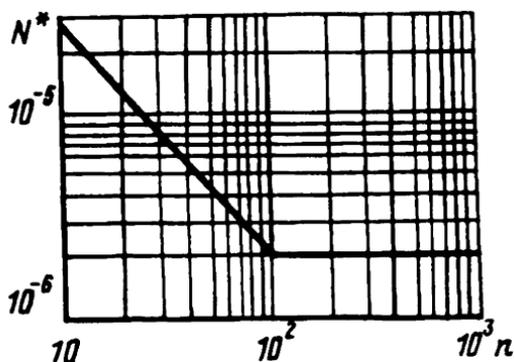


Рис 2.47. Зависимость критерия подобия N^* от перегрузки n при статическом методе испытаний

Параметры, находящиеся на линии, представленной на графике, считаются оптимальными, что позволяет сделать предварительную оценку возможностей центробежных стендов. Обычно критерий M/m находится в пределах от 25 до 76 и составляет в среднем 57. Критерий A/l следует выбирать как можно меньшим, чтобы повысить точность воспроизведения перегрузок, но, с другой стороны, это приведет к увеличению N^* , т.е. к нерациональному использованию вводимой мощности. Поэтому A/l колеблется в пределах 0,2—0,25.

Для центробежных стендов с ударным приводом используют следующую систему определяющих параметров:

1. Геометрические параметры: R — расстояние от оси вращения планшайбы до передаточного звена; l — длина плеча планшайбы.

2. Кинематические параметры движения: t — текущий момент времени; α_y — деформация элемента; ω_0 — начальная угловая скорость ротора; w — текущее значение ускорения; P — усилие удара.

3. Динамический параметр движения — момент инерции системы «ротор—планшайба» J .

4. Физическая постоянная — плотность деформируемого элемента ρ .

Используя метод нулевых размерностей, получаем следующие критерии подобия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_1 = \frac{wt^2}{R}; \quad \Pi_2 = \omega_0 t; \quad \Pi_3 = \frac{J}{PRt^2}; \\ \Pi_4 = \frac{\rho R^4}{Pt^2}; \quad \Pi_5 = \frac{l}{R}; \quad \Pi_6 = \frac{\alpha_y}{R}. \end{array} \right.$$

Для подобия двух систем достаточно равенства соответствующих критериев, т.е., имея данные об одном модельном испытании на центробежном стенде, можно рассчитать параметры центробежного стенда для натуральных условий испытаний.

Результат воздействия различных нагрузок, действующих на ЛА одновременно, является значительно большим, чем результат от суммы воздействия тех же нагрузок, приложенных к ЛА поочередно. Однако одновременное воспроизведение в процессе испытаний многих нагрузок вызывает часто непреодолимые технические трудности, и практически приходится принимать компромиссные решения.

Общее число сочетаний различных видов нагрузок

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!},$$

где n — общее число возможных нагрузок; m — количество нагрузок, которые можно воспроизвести одновременно.

Если принять $n = 8$, а $m = 3$, то $C_8^3 = 56$, и рассмотреть все возможные случаи сочетаний практически невозможно.

Для воспроизведения одновременного воздействия центробежных и вибрационных нагрузок применяется специальный комбинированный стенд (рис. 2.48).

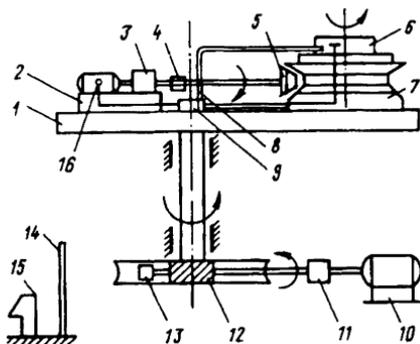


Рис. 2.48. Схема комбинированного стенда для одновременного воспроизведения центробежных и вибрационных механических нагрузок:

- 1 - планшайба; 2 - противовес;
- 3 - редуктор; 4 - муфта; 5 - редуктор;
- 6 - объект испытаний; 7 - вибратор;
- 8 - воздухопровод; 9 - центральный коллектор центрифуги; 10 - электродвигатель;
- 11 - муфта привода;
- 12 - редуктор; 13 - дистанционный первичный преобразователь;
- 14 - бронеплита; 15 - пульт управления;
- 16 - электродвигатель прибора поворотного устройства

Он состоит из центрифуги, приводимой в действие электродвигателем через червячный редуктор; электродинамического вибратора, закрепленного на центральном столе центрифуги, и поворотного устройства, установленного на столе вибратора и приводимого в действие электродвигателем через трехступенчатый цилиндрический редуктор. Для устранения передачи вибрации на цилиндрический редуктор и электродвигатель поворотного устройства на валу, соединяющем редуктор, установленный на противовесе, с поворотным устройством, служат две шарнирные муфты.

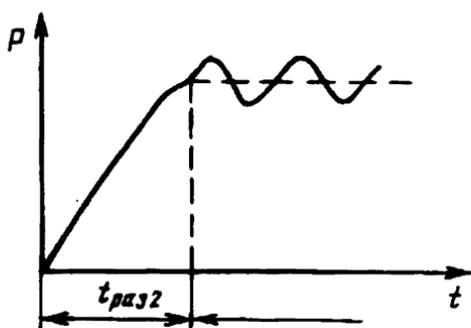


Рис. 2.49. Характер комбинированного воздействия на объект испытаний

После включения центрифуги с пульта управления и выхода ее на заданную частоту вращения (в зависимости от нагрузки) запускают вибратор и поворотное устройство. Характер комбинированного воздействия на объект испытаний указан на рис. 2.49. Объект испытаний устанавливается на поворотном устройстве так, что ось вращения проходит через

центр объекта, чтобы при работе объекта все его точки нагружались одинаково (хотя и периодически) осевыми инерционными нагрузками.

2.2.4.

Испытания на воздействие ударных нагрузок

В механике ударом называют механическое воздействие материальных тел, приводящее к конечному изменению скоростей их точек за бесконечно малый промежуток времени. Ударное движение — движение, возникающее в результате однократного взаимодействия тела (среды) с рассматриваемой системой при условии, что наименьший период собственных колебаний системы или ее постоянная времени соизмеримы или больше времени взаимодействия.

При ударном взаимодействии в рассматриваемых точках определяют ударные ускорения, скорость или перемещение. В совокупности такие воздействия и реакции называют ударными процессами. Механические удары могут быть одиночными, многократными и комплексными. Одиночные и многократные ударные процессы могут воздействовать на аппарат в продольном, поперечном и любом промежуточном направлениях. Комплексные ударные нагрузки оказывают воздействие на объект в двух или трех взаимно перпендикулярных плоскостях одновременно. Ударные нагрузки на ЛА могут быть как непериодическими, так и периодическими. Возникновение ударных нагрузок связано с резким изменением ускорения, скорости или направления перемещения ЛА. Наиболее часто в реальных условиях встречается сложный одиночный ударный процесс, представляющий собой сочетание простого ударного импульса с наложенными колебаниями.

Основные характеристики ударного процесса:

законы изменения во времени ударного ускорения $a(t)$, скорости $V(t)$ и перемещения $X(t)$;

длительность действия ударного ускорения τ — интервал времени от момента появления до момента исчезновения ударного ускорения, удовлетворяющий условию $a \geq a_n$, где a_n — пиковое ударное ускорение;

длительность фронта ударного ускорения τ_f — интервал времени от момента появления ударного ускорения до момента, соответствующего его пиковому значению;

коэффициент наложенных колебаний ударного ускорения — отношение полной суммы абсолютных значений приращений между смежными и экстремальными значениями ударного ускорения к его удвоенному пиковому значению;

импульс ударного ускорения — интеграл от ударного ускорения за время, равное длительности его действия.

По форме кривой функциональной зависимости параметров движения ударные процессы разделяют на простые и сложные. Простые процессы не содержат высокочастотных составляющих, и их характеристики аппроксимируются простыми аналитическими функциями. Наименование функции определяется формой кривой, аппроксимирующей зависимость ускорения от времени (полусинусоидальная, косинусоидальная, прямоугольная, треугольная, пилообразная, трапецидальная и т.д.).

Механический удар характеризуется быстрым выделением энергии, в результате чего возникают местные упругие или пластические деформации, возбуждение волн напряжения и другие эффекты, приводящие иногда к нарушению функционирования и к разрушению конструкции ЛА. Ударная нагрузка, приложенная к ЛА, возбуждает в нем быстрозатухающие собственные колебания. Значение перегрузки при ударе, характер и скорость распределения напряжений по конструкции ЛА определяются силой и продолжительностью удара и характером изменения ускорения. Удар, действуя на ЛА, может вызвать его механическое разрушение. В зависимости от длительности, сложности ударного процесса и его максимального ускорения при испытаниях определяют степень жесткости элементов конструкции ЛА. Простой удар может вызвать разрушение вследствие возникновения сильных, хотя и кратковременных перенапряжений в материале. Сложный удар может привести к накоплению микродеформаций усталостного характера. Так как конструкция ЛА обладает резонансными свойствами, то даже простой удар может вызвать колебательную реакцию в ее элементах, также сопровождающуюся усталостными явлениями.

Механические перегрузки вызывают деформацию и поломку деталей, ослабление соединений (сварных, резьбовых и заклепочных), отвинчивание винтов и гаек, перемещение механизмов и органов управления, в результате чего изменяется регулировка и настройка приборов и появляются другие неисправности.

Борьба с вредным действием механических перегрузок ведется различными путями: увеличением прочности конструкции, использованием деталей и элементов с повышенной механической прочностью, применением амортизаторов и специальной упаковки, рациональным размещением приборов. Меры защиты от вредного воздействия механических перегрузок делят на две группы: 1) меры, направленные на обеспечение требуемой механической прочности и жесткости конструкции; 2) меры, направленные на изоляцию элементов конструкции от механических воздействий. В последнем случае применяют различные амортизирующие средства, изолирующие прокладки, компенсаторы и демпферы.

Общая задача испытаний ЛА на воздействие ударных нагрузок состоит в проверке способности ЛА и всех его элементов выполнять свои функции в процессе ударного воздействия и после него, т.е. сохранять свои технические параметры при ударном воздействии и после него в пределах, указанных в нормативно-технических документах.

Основные требования при ударных испытаниях в лабораторных условиях — максимальная приближенность результата испытательного удара на объект к эффекту реального удара в натуральных условиях эксплуатации и воспроизводимость ударного воздействия.

При воспроизведении в лабораторных условиях режимов ударного нагружения накладывают ограничения на форму импульса мгновенного ускорения как функции времени (рис. 2.50), а также на допустимые пределы отклонений формы импульса. Практически каждый ударный импульс на лабораторном стенде сопровождается пульсацией, являющейся следствием резонансных явлений в ударных установках и вспомогательном оборудовании. Так как спектр ударного импульса в основном является характеристикой разрушающего действия удара, то наложенная даже небольшая пульсация может сделать результаты измерений недостоверными.

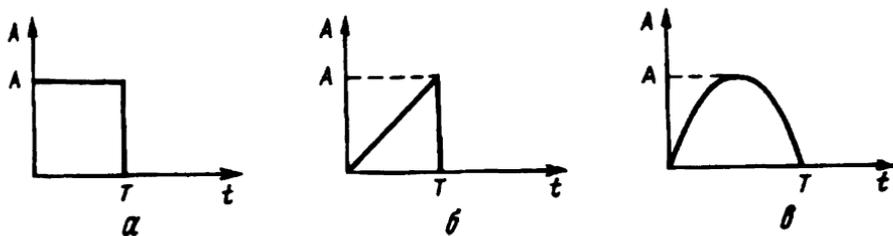


Рис. 2.50. Формы импульсов при испытаниях на удар:
 а - прямоугольная; б - пилообразная; в - полусинусоидальная

Испытательные установки, имитирующие отдельные удары с последующими колебаниями, составляют специальный класс оборудования для механических испытаний. Ударные стенды можно классифицировать по различным признакам (рис. 2.51):

- I — по принципу формирования ударного импульса;
- II — по характеру испытаний;
- III — по виду воспроизводимого ударного нагружения;
- IV — по принципу действия;
- V — по источнику энергии.



Рис. 2.51. Классификация ударных стендов

В общем виде схема ударного стенда состоит из следующих элементов (рис. 2.52): испытуемого объекта, укрепленного на платформе или контейнере вместе с датчиком ударной перегрузки; средства разгона для сообщения объекту необходимой скорости; тормозного устройства; системы управления; регистрирующей аппаратуры для записей исследуемых параметров объекта и закона изменения ударной перегрузки; первичных преобразователей; вспомогательных приборов для регулировки режимов функционирования испытуемого объекта; источников питания, необходимых для работы испытуемого объекта и регистрирующей аппаратуры.

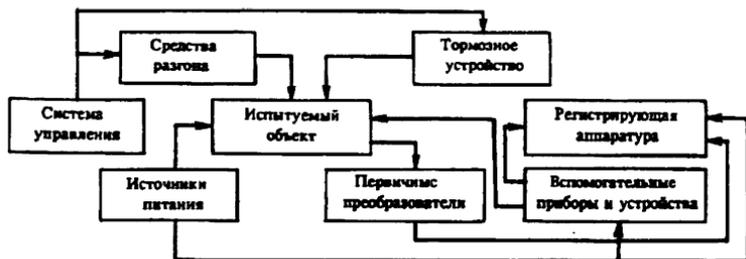


Рис. 2.52. Структурная схема ударного стенда

Простейшим стендом для ударных испытаний в лабораторных условиях является стенд, работающий по принципу сбрасывания закрепленного на каретке испытуемого объекта с некоторой высоты, т.е. использующий для разгона силы земного тяготения. При этом форма ударного импульса определяется материалом и формой соударяющихся поверхностей. На таких стендах можно обеспечить ускорение до 80000 м/с^2 . На рис. 2.53, а и б приведены принципиально возможные схемы таких стендов.

В первом варианте (рис. 2.53, а) специальный кулачок 3 с храповым зубом приводится во вращение мотором. По достижении кулачком максимальной высоты H стол 1 с объектом испытания 2 падает на тормозные устройства 4, которые и сообщают ему удар. Ударная перегрузка зависит от высоты падения H , жесткости тормозящих элементов k , суммарной массы стола и объекта испытания M и определяется следующей зависимостью:

$$n = \sqrt{1 + \frac{2kH}{Mg}}$$

Варьируя эти величины, можно получить различные перегрузки.

Во втором варианте (рис. 2.53, б) стенд работает по методу сбрасывания.

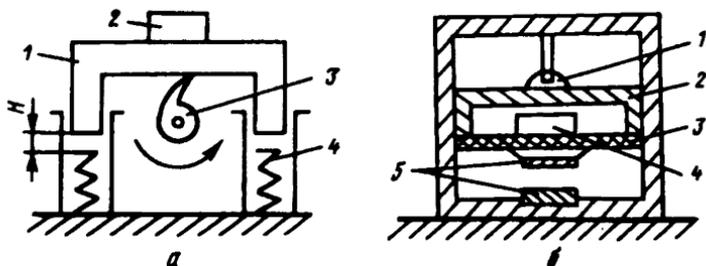


Рис. 2.53. Схемы ударных стендов, использующих силы земного тяготения:

а – стенд для испытаний на периодические ударные нагрузки:

(1 – стол; 2 – объект испытаний; 3 – кулачок; 4 – тормозное устройство);
б – стенд для испытаний на одиночные ударные нагрузки (1 – устройство для подъема каретки (платформы); 2 – скользящая рама; 3 – каретка (платформа); 4 – объект испытаний; 5 – соударяющаяся поверхность тормозного устройства)

Испытательные стенды, использующие гидравлический либо пневматический привод для разгона каретки, практически не зависят от действия гравитации. На рис. 2.54 показаны два варианта ударных пневматических стендов.

Принцип работы стенда с пневмопушкой (рис. 2.54, *а*) заключается в следующем. В рабочую камеру 1 подается сжатый газ. При достижении заданного давления, которое контролируется манометром, срабатывает автомат 2 освобождения контейнера 3, где размещен испытуемый объект. При выходе из ствола 4 пневмопушки контейнер контактирует с устройством 5, которое позволяет измерять скорость движения контейнера. Пневмопушка через амортизаторы крепится к опорным стойкам 6. Заданный закон торможения на амортизаторе 7 реализуется за счет изменения гидравлического сопротивления перетекающей жидкости 9 в зазоре между специально спрофилированной иглой 8 и отверстием в амортизаторе 7.

Конструктивная схема другого пневматического ударного стенда (рис. 2.54, *б*) состоит из объекта испытаний 1, каретки 2, на которой установлен объект испытаний, прокладки 3 и тормозного устройства 4, клапанов 5, позволяющих создавать заданные перепады давления газа на поршне 6, и системы подачи газа 7. Тормозное устройство включается сразу же после соударения каретки и прокладки, чтобы предотвратить обратный ход каретки и искажение форм ударного импульса. Управление такими стендами может быть автоматизировано. На них можно воспроизвести широкий диапазон ударных нагрузок.

В качестве разгонного устройства могут быть использованы резиновые амортизаторы, пружины, а также, в отдельных случаях, линейные асинхронные двигатели.

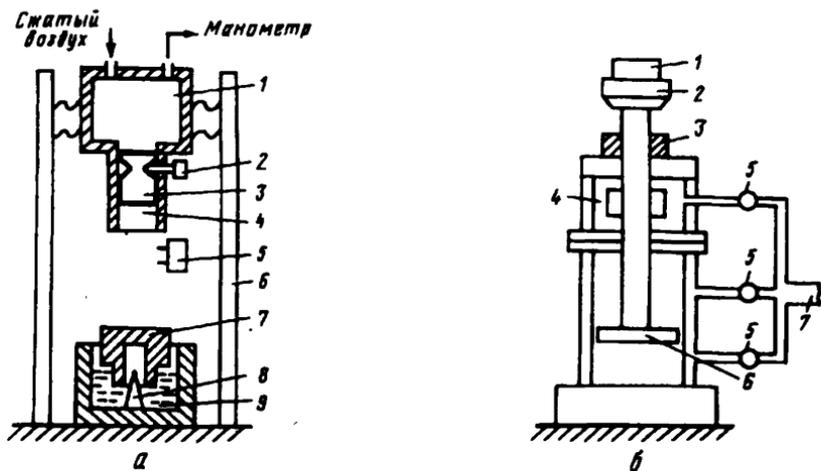


Рис. 2.54. Схемы ударных стенов с пневмоприводами

Возможности практически всех ударных стенов определяются конструкцией тормозных устройств:

1. Удар испытуемого объекта с жесткой плитой характеризуется торможением за счет возникновения упругих сил в зоне контакта. Такой способ торможения испытуемого объекта позволяет получать большие значения перегрузок с малым фронтом их нарастания (рис. 2.55, а).

2. Для получения перегрузок в широком диапазоне, от десятков до десятков тысяч единиц, с временем нарастания их от десятков микросекунд до нескольких миллисекунд используют деформируемые элементы в виде пластины или прокладки, лежащей на жестком основании. Материалами этих прокладок могут быть сталь, латунь, медь, свинец, резина и т.д. (рис. 2.55, б).

3. Для обеспечения какого-либо конкретного (заданного) закона изменения n и t в небольшом диапазоне используют деформируемые элементы в виде наконечника (крешера), который устанавливается между плитой ударного стенов и испытуемым объектом (рис. 2.55, в).

4. Для воспроизведения удара с относительно большим путем торможения применяют тормозное устройство, состоящее из свинцовой, пластически деформируемой плиты, расположенной на жестком основании стенов, и внедряющегося в нее жесткого наконечника соответствующего профиля (рис. 2.55, г), закрепленного на объекте или платформе стенов. Такие тормозные устройства позволяют получать перегрузки в широком диапазоне $n(t)$ с небольшим временем их нарастания, достигающим до десятков миллисекунд.

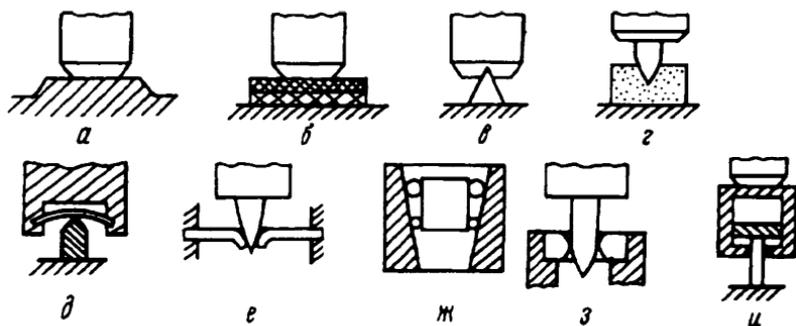


Рис. 2.55. Схемы тормозных устройств для ударных стендов

5. В качестве тормозного устройства может быть использован упругий элемент в виде рессоры (рис. 2.55, *д*), установленной на подвижной части ударного стенда. Такой вид торможения обеспечивает получение относительно малых перегрузок полусинусоидальной формы с продолжительностью, измеряемой миллисекундами.

6. Пробиваемая металлическая пластина, закреплённая по контуру в основании установки, в сочетании с жестким наконечником платформы или контейнера, обеспечивает получение относительно малых перегрузок (рис. 2.55, *е*).

7. Деформируемые элементы, установленные на подвижной платформе стенда (рис. 2.55, *ж*), в сочетании с жестким коническим уплывителем обеспечивают получение длительно действующих перегрузок с временем нарастания до десятков миллисекунд.

8. Тормозное устройство с деформируемой шайбой (рис. 2.55, *з*) позволяет получать большие пути торможения объекта (до 200 — 300 мм) при малых деформациях шайбы.

9. Создание в лабораторных условиях интенсивных ударных импульсов с большими фронтами возможно при использовании пневматического тормозного устройства (рис. 2.55, *и*). К числу достоинств пневмодемпфера следует отнести его многоразовое действие, а также возможность воспроизведения ударных импульсов различной формы, в том числе и со значительным заданным фронтом.

10. В практике проведения ударных испытаний широкое применение получило тормозное устройство в виде гидравлического амортизатора (см. рис. 2.54, *а*). При ударе испытуемого объекта об амортизатор его шток погружается в жидкость. Жидкость выталкивается через очко штока по закону, определяемому профилем регулирующей иглы. Изменяя профиль иглы, можно реализовать различный вид закона торможения. Профиль иглы можно получить расчетным путем, но при этом слишком трудно учесть, например, наличие воздуха в полости поршня, силы тре-

ния в уплотнительных устройствах и т.д. Поэтому расчетный профиль необходимо экспериментально корректировать. Таким образом, расчетно-экспериментальным методом можно получить профиль, необходимый для реализации любого закона торможения.

Проведение ударных испытаний в лабораторных условиях выдвигает и ряд специальных требований к монтажу объекта. Так, например, максимально допустимое перемещение в поперечном направлении не должно превышать 30% номинальной величины; как при испытаниях на ударную устойчивость, так и при испытаниях на ударную прочность изделие должно иметь возможность устанавливаться в трех взаимно перпендикулярных положениях с воспроизведением необходимого количества ударных импульсов. Разовые характеристики измерительного и регистрирующего оборудования должны быть идентичными в широком диапазоне частот, что гарантирует правильную регистрацию соотношений различных частотных составляющих измеряемого импульса.

Вследствие разнообразия передаточных функций различных механических систем один и тот же ударный спектр может быть вызван ударным импульсом различной формы. Это означает, что не существует однозначного соответствия некоторой временной функции ускорения и ударного спектра. Поэтому с технической точки зрения более правильно задавать технические условия на ударные испытания, содержащие требования к ударному спектру, а не к временной характеристике ускорения. В первую очередь это относится к механизму усталостного разрушения материалов вследствие накопления циклов нагружений, которые могут быть различными от испытаний к испытанию, хотя пиковые значения ускорения и напряжения будут оставаться постоянными.

При моделировании ударных процессов системы определяющих параметров целесообразно составлять по выявленным факторам, необходимых для достаточно полного определения искомой величины, которую иногда можно найти только экспериментальным путем.

Рассматривая удар массивного, свободно движущегося жесткого тела по деформируемому элементу относительно малого размера (например, по тормозному устройству стенда), закрепленному на жестком основании, требуется определить параметры ударного процесса и установить условия, при которых такие процессы будут подобными друг другу. В общем случае пространственного движения тела можно составить шесть уравнений, три из которых дает закон сохранения количества движения, два — законы сохранения массы и энергии, шестым является уравнение состояния. В указанные уравнения входят следующие величины: три компоненты скорости V_X ; V_Y ; V_Z , плотность ρ , давление p и энтропия. Пренебрегая диссипативными силами и считая состояние деформируемого объема изотропическим, можно исключить из числа определяющих параметров энтропию. Так как рассматривается только движение центра масс тела, то можно не включать в число

определяющих параметры компоненты скоростей V_X ; V_Y ; V_Z и координаты точек X , Y , Z внутри деформируемого объекта. Состояние деформируемого объема будет характеризоваться следующими определяющими параметрами:

- плотностью материала ρ ;
- давлением p , которое целесообразно учитывать через величину максимальной местной деформации и α_{\max} , рассматривая ее как обобщенный параметр силовой характеристики в зоне контакта;
- начальной скоростью удара v_0 , которая направлена по нормали к поверхности, на которой установлен деформируемый элемент;
- текущим временем t ;
- массой тела m ;
- ускорением свободного падения g ;
- модулем упругости материалов E , так как напряженное состояние тела при ударе (за исключением зоны контакта) считается упругим;
- характерным геометрическим параметром тела (или деформируемого элемента) D .

В соответствии с π -теоремой, из восьми параметров, среди которых три имеют независимые размерности, можно составить пять независимых безразмерных комплексов:

$$\Pi_1 = \frac{V_0 t}{\alpha_{\max}}; \quad \Pi_2 = -\frac{m}{\rho \alpha_{\max}^3}; \quad \Pi_3 = \frac{V_0}{\sqrt{g} \alpha_{\max}}; \quad \Pi_4 = \frac{D}{\alpha_{\max}}; \quad \Pi_5 = \frac{\rho V_0^2}{E}. \quad (2.64)$$

Безразмерные комплексы, составленные из определяемых параметров ударного процесса, будут некоторыми функциями независимых безразмерных комплексов $\Pi_1 - \Pi_5$.

К числу определяемых параметров относятся:

- текущая местная деформация α ;
- скорость тела V ;
- контактная сила P ;
- напряжение внутри тела σ .

Следовательно, можно записать функциональные соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} &= f_1(\Pi_1, \dots, \Pi_5); \\ \frac{V}{V_0} &= f_2(\Pi_1, \dots, \Pi_5); \\ \frac{P}{\rho \alpha_{\max}^2 V_0^2} &= f_3(\Pi_1, \dots, \Pi_5); \\ \frac{\sigma}{E} &= f_4(\Pi_1, \dots, \Pi_5). \end{aligned} \quad (2.65)$$

Вид функций f_1, f_2, f_3, f_4 может быть установлен экспериментально, с учетом большого количества определяющих параметров.

Если при ударе в сечениях тела за пределами зоны контакта не появляются остаточные деформации, то деформация будет иметь местный характер, и, следовательно, комплекс $\Pi_5 = \rho V_0^2/E$ можно исключить.

Комплекс $\Pi_2 = m/(\rho\alpha_{\max}^3) = C_m$ называется коэффициентом относительной массы тела.

Коэффициент силы сопротивления пластическому деформированию C_P связан непосредственно с показателем силовой характеристики N (коэффициентом податливости материала, зависящим от формы соударяющихся тел) следующей зависимостью:

$$C_P = \frac{P}{\rho\alpha^2 V_0^2} = \frac{1+N}{2N} C_m \Psi, \quad (2.66)$$

где ρ — приведенная плотность материалов в зоне контакта; $C_m = m/(\rho\alpha^3)$ — приведенная относительная масса соударяющихся тел, характеризующая отношение их приведенной массы M к приведенной массе деформируемого объема в зоне контакта; Ψ — безразмерный параметр, характеризующий относительную работу деформирования.

Функцией $C_P = f_3(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4)$ можно воспользоваться для определения перегрузок:

$$n = \frac{P}{mg} = \frac{\rho\alpha_{\max}^2 V_0^2}{mg} C_P. \quad (2.67)$$

Если обеспечить равенство числовых значений безразмерных комплексов $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4$ для двух ударных процессов, то эти условия, т.е.

$$\frac{V_0 t}{\alpha_{\max}} = \text{const}; C_m = \text{const}; \frac{V_0}{\sqrt{g\alpha_{\max}}} = \text{const}; \frac{P}{\alpha_{\max}} = \text{const}, \quad (2.68)$$

будут представлять собой критерии подобия данных процессов.

При выполнении указанных условий одинаковыми будут и числовые значения функций f_1, f_2, f_3, f_4 , т.е. в сходственные моменты времени $\alpha/\alpha_{\max} = \text{const}; V/V_0 = \text{const}; C_P = \text{const}$, что и позволяет определять

параметры одного ударного процесса простым пересчетом параметров другого процесса. Необходимые и достаточные требования физического моделирования ударных процессов можно сформулировать следующим образом:

1. Рабочие части модели и натурального объекта должны быть геометрически подобными.

2. Безразмерные комплексы, составленные из определяющих параметров, должны удовлетворять условию (2.68).

Вводя масштабные коэффициенты

$$M_D = \frac{D}{D_m}; M_{\alpha_m} = \frac{\alpha_{\max}}{(\alpha_{\max})_m}; M_{V_0} = \frac{V_0}{(V_0)_m}; M_\rho = \frac{\rho}{\rho_0}; M_m = \frac{m}{m_m}; M_t = \frac{t}{t_m} \quad (2.69)$$

и считая $g = \text{const}$, критерий подобия (2.68) можно записать в виде соотношений масштабов $M_{\alpha_m} = M_D; M_D = M_{V_0}^2; M_{V_0} M_t = M_D; M_m = M_\rho M_D^3$, откуда $M_t = M_{V_0}; M_m = M_{V_0}^\sigma M_\rho$.

При соблюдении этих соотношений (равносильных условиям подобия ударных процессов) пересчет параметров ударного процесса с модели на натуру, согласно (2.68), можно выполнять по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_m M_{\alpha_m} = \alpha_m M_D = \alpha_m M_{V_0}^2; \\ V &= V_m M_{V_0} = V_m M_t; \\ P &= C_m M_\rho M_{\alpha_m}^2 M_{V_0}^2 = P_m M_\rho M_{V_0}^\sigma = P_m M_\rho M_D^3. \end{aligned} \right\} \quad (2.70)$$

Пересчет производится в сходственных точках и в сходственные моменты времени

$$t = t_m \frac{M_D}{M_{V_0}} = t_m M_{V_0}. \quad (2.71)$$

Для учета напряжений, возникающих в теле при ударе, необходимо учитывать комплекс $\Pi_5 = \rho V_0^2 / E$, т. е. $\rho V_0^2 / E = \text{const}$ или $M_\rho M_{V_0}^2 / M_E = 1$.

При выполнении этого условия будет обеспечено также равенство числовых значений функций $\frac{\sigma}{E} = f_4(\Pi_1, \dots, \Pi_5)$, т.е. напряжение можно находить по следующей формуле пересчета:

$$\sigma = \sigma_m M_E. \quad (2.72)$$

Необходимо иметь в виду, что при моделировании только параметров ударного процесса напряженные состояния тел (натуры и модели) будут обязательно различными.

2.2.5.

Газодинамические испытания

Общие принципы моделирования при газодинамических испытаниях

Исследование газодинамических процессов обтекания конструкции ЛА позволяет определить силовые нагрузки, связанные с распределением сил аэродинамического давления и трения вдоль внешней поверхности, с возникновением явлений аэроупругости (например, флаттера, бафтинга и т.д.) и акустическим воздействием. С другой стороны, результаты исследований газодинамических характеристик обтекания являются необходимой информацией для оценки тепловых нагрузок, возникающих при аэродинамическом нагреве.

Возможны два метода исследования законов воздействия газа на испытываемый объект:

— сообщение газу некоторой скорости по отношению к неподвижно укрепленному телу;

— сообщение телу некоторой скорости относительно неподвижного газа.

Первый метод реализуется в аэродинамических трубах — установках, в которых создается газовый поток с заданными параметрами для исследования обтекания твердых тел.

Второй метод осуществляется с применением баллистических установок или ракетных трасс.

Так как в обоих случаях испытания главным образом проводятся на моделях, что объясняется ограниченностью энергетических возможностей испытательных центров, рассмотрим основные понятия, связанные с подобием при моделировании в экспериментальной аэродинамике.

Физическое моделирование основывается на *физическом подобии* явлений.

Геометрическое подобие предполагает пропорциональность сходственных линейных размеров для модели и натур: $l_M/l_n = C_1$.

Кинематическое подобие предполагает, что кинематические характеристики сходственных частиц подобных потоков, обтекающих геометрически подобные тела, пропорциональны, т.е. в пропорциональные отрезки времени ($t_M/t_n = C_2$) частицы проходят подобные пути, а скорости и ускорения в сходственных точках пропорциональны и ориентация этих векторов в пространстве одинакова:

$$\frac{V_M}{V_n} = C_3; \quad \frac{w_M}{w_n} = C_4,$$

где V — скорость потока; w — ускорение.

Динамическое подобие предполагает, что силы, действующие в сходственных точках, пропорциональны и одинаково ориентированы:

$$\frac{P_M}{P_n} = C_5.$$

Подобие называется *полным*, если во всем пространстве, окружающем модель и натуру, соблюдается подобие картин обтекания в целом, т.е. в сходственных пространственно-временных точках выполнены необходимые и достаточные условия подобия.

Если это условие не соблюдается, то подобие называется *неполным* или *частичным*. На практике частичное подобие осуществляется довольно часто. При моделировании явления с осуществлением частичного подобия важной задачей является выбор наиболее существенного для данного явления критерия подобия (например, коэффициент сопротивления C_X при определенных значениях практически не зависит от Re и M и достижение высоких значений Re и M при моделировании и определении C_X не нужно).

Важнейшими критериями подобия в гидроаэродинамике являются числа Рейнольдса (Re), Фруда (Fr), Маха (M), Струхала (Sh).

Если сравниваются потоки, в которых основную роль играют силы вязкости, то числа Рейнольдса для модели и натуры должны быть одинаковы:

$$Re_M = Re_n.$$

Число Рейнольдса представляет собой отношение инерционных сил к силам вязкости в потоке и характеризует вязкость среды:

$$Re = \frac{Vl}{\nu}; \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}; \quad Re = \frac{Vl\rho}{\mu},$$

где V — скорость потока; l — линейный размер; ν — кинематическая вязкость; μ — динамическая вязкость; ρ — плотность.

Тогда закон подобия с учетом вязкости запишется в виде

$$\frac{V_M l_M}{\nu_M} = \frac{V_n l_n}{\nu_n}.$$

При осуществлении подобия по числу Re можно оперировать тремя параметрами: скоростью V ; линейным размером l ; кинематической вязкостью ν .

Значения параметров V и l ограничены тем, что, во-первых, нельзя увеличивать скорость потока в аэродинамических трубах, поскольку это снижает качество трубы и требует учета сжимаемости воздуха, а во-вторых, нельзя делать очень большие модели.

Чтобы получить большие числа Re , соответствующие натурным условиям, изменяют кинематическую вязкость ν , изменяя плотность газа ρ . Для такого рода экспериментов строят аэродинамические трубы с переменной плотностью сжатого воздуха.

Если в сравниваемых потоках основную роль играют силы тяжести, т.е. предполагается, что среда несжимаемая и невязкая, то основное значение будет иметь число Фруда.

Число Фруда представляет собой отношение инерционных сил к силам тяжести в потоке газа:

$$Fr = \frac{v^2}{gl}.$$

Если числа Фруда для модели и для натуральных условий равны ($Fr_M = Fr_N$), то говорят, что выполнено частичное подобие по весомости среды, т.е.

$$\frac{v_M^2}{g_M l_M} = \frac{v_N^2}{g_N l_N}.$$

Если $g_M = g_N$ (ускорение свободного падения для двух потоков), что в подавляющем большинстве опытов выполняется, то линейные размеры модели и натурны пропорциональны квадратам скоростей:

$$\frac{l_M}{l_N} = \frac{v_M^2}{v_N^2}.$$

Следовательно, $v_M = v_N \sqrt{l_M/l_N}$, т.е. скорость на модели должна быть меньше, чем в натуральных условиях.

Число Маха представляет собой отношение скорости течения газа к скорости звука в той же точке газообразной среды:

$$M = v/a.$$

Если два потока, обтекающие модель и натуральный объект, являются потоками сжимаемой среды, а сжимаемость зависит от скорости движения потоков и при $v > 70$ м/с ее надо учитывать, то подобие по сжимаемости будет достигнуто в том случае, когда будет выполняться равенство чисел Маха для модели и натурального изделия, т.е.

$$M_M = M_N.$$

$$\frac{V_H}{a_H} = \frac{V_M}{a_M},$$

где V_H и V_M — скорости полета натурального изделия и модели соответственно; a_H и a_M — скорость звука в натуральных условиях и в условиях испытаний соответственно.

Число Маха оказывает существенное влияние на характер изменения коэффициентов аэродинамических сил и моментов.

Большой интерес представляет случай, когда надо соблюсти частичное подобие по вязкости и сжимаемости (Re и M), т.е.

$$\frac{V_M l_M}{\nu_M} = \frac{V_H l_H}{\nu_H}; \quad \frac{V_H}{a_H} = \frac{V_M}{a_M}.$$

Из второго соотношения следует, что если $a_M = a_H$, то $V_H = V_M$, т.е. скорости модели и натурального объекта должны быть одинаковы.

Из первого соотношения $l_H/l_M = \nu_H/\nu_M$, т.е. отношение линейных размеров пропорционально отношению значений кинематической вязкости. Известно, что кинематическая вязкость зависит от давления следующим образом: $\nu = \mu/\rho$. Если значения динамической вязкости μ у моделируемого и натурального потоков одинаковы ($\mu_M = \mu_H$, где μ характеризует силы внутреннего трения и зависит от природы жидкости и его температуры и практически не зависит от давления), то

$$\rho_M = \rho_H \frac{l_H}{l_M}.$$

Положив $T_H = T_M$ и используя уравнение состояния ($p = \rho RT$), получим

$$p_M = p_H \frac{l_H}{l_M},$$

т.е. для обеспечения равенства чисел Re и M модельного и натурального потоков необходимо у модельного потока увеличить статическое давление в рабочей части аэродинамической трубы в $\frac{l_H}{l_M}$ раз. В связи с

этим подобие по критериям Re и M осуществляется при проведении опыта в высокоскоростной трубе переменного давления.

При изучении неустановившихся или периодических движений (колебания крыльев, обтекание вращающегося винта, изменение скорости в следе за телом, образование вихрей и т.д.) подобие осуществляется по числу *Струхала*, которое представляет собой отношение

времени протекания процесса T к времени, в течение которого элемент рассматриваемой среды, движущейся со скоростью v , проходит расстояние l :

$$\text{Sh} = \frac{vT}{l} = \frac{v}{\ln},$$

где v — скорость набегающего потока; T — период протекания нестационарного процесса; l — характерный размер; \ln — число колебаний в секунду.

При моделировании температурных полей в потоках, обтекающих тело, необходимо осуществить подобие по числу Пекле (Pe):

$$\text{Pe} = \frac{vl}{a} = \frac{vc_p \rho}{\lambda},$$

где $a = \lambda / (c_p \rho)$ — коэффициент температуропроводности данного газа; λ — коэффициент теплопроводности; ρ — плотность газа; c_p — удельная теплоемкость газа при $p = \text{const}$.

Если числитель и знаменатель домножить на ΔT (разность температур в двух характерных точках), то число Pe можно представить в следующем виде:

$$\text{Pe} = \frac{vc_p l \rho \Delta T}{\lambda \Delta T},$$

т.е. в виде отношения теплового потока, переносимого жидкостью, движущейся со скоростью v через единицу площади, к тепловому потоку, проходящему через слой толщиной l вследствие его теплопроводности.

В таком виде критерий Pe можно рассматривать как меру относительной роли молярного и молекулярного переноса тепла.

При моделировании температурных и скоростных полей в потоках, обтекающих тело, подобие осуществляется по числу *Прандтля*, характеризующему отношение интенсивности переноса количества движения вследствие динамической вязкости к интенсивности теплопередачи вследствие теплопроводности:

$$\text{Pr} = \frac{\text{Pe}}{\text{Re}} = \frac{c_p \mu}{\lambda}.$$

При исследовании гидродинамических сопротивлений в каналах определяющим критерием является число Эйлера, характеризующее соотношение сил давления и сил инерции в потоке:

$$Eu = \frac{p}{\rho v^2},$$

где p — статическое давление; ρv^2 — скоростной напор.

При изучении течений разреженных газов подобие осуществляется по числу *Кнудсена*, представляющему собой отношение длины свободного пробега молекулы газа L к характерному линейному размеру l :

$$Kn = \frac{L}{l} \approx \sqrt{\frac{\pi k}{2} \frac{M}{Re}},$$

где L — длина свободного пробега молекул; l — характерный линейный размер.

Аэродинамические трубы

В зависимости от скорости потока в рабочей части аэродинамические трубы делятся на следующие виды:

- а) дозвуковые ($0 < M < 0,8$);
- б) околозвуковые и трансзвуковые ($0,8 < M < 1,2$);
- в) сверхзвуковые ($1,2 < M < 5$);
- г) гиперзвуковые ($M > 5$).

По конструктивным признакам аэродинамические трубы можно разбить на два класса:

- а) трубы незамкнутого типа;
- б) трубы замкнутого типа.

По виду рабочей части различаются трубы:

- а) с открытой рабочей частью;
- б) с закрытой рабочей частью;
- в) с герметической камерой (камера Эйфеля).

Испытания, проводимые на аэродинамических трубах, в основном решают следующие задачи:

1. Исследование влияния формы обтекаемого газом объекта на аэродинамические характеристики этого объекта в зависимости от скорости набегающего потока и положения тела в пространстве.

2. Исследование воздушных машин — газовых турбин, компрессоров, винтов, ветряков, вентиляторов и т.п.

3. Исследование характеристик двигателей (поршневых турбореактивных, прямоточных и др.).

4. Исследование динамики полета ЛА.

5. Исследование влияния аэродинамических сил на упругие характеристики конструкций ЛА (например, исследование флаттера крыльев самолетов).

6. Физические исследования, связанные с течением воздуха в различных условиях (исследование пограничного слоя, сверхзвуковых течений, пространственных течений и т.п.).

7. Методические исследования, связанные с созданием аэродинамических труб как физических установок и с разработкой методов испытаний в трубах и обработки полученных результатов.

Дозвуковые трубы. На рис. 2.56 приведена схема дозвуковой незамкнутой аэродинамической трубы.

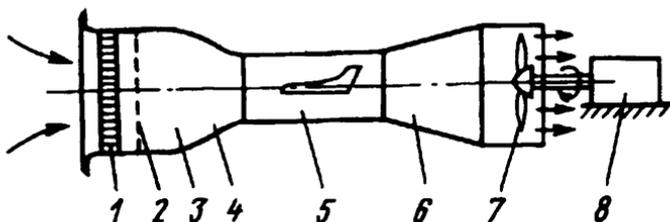


Рис. 2.56. Схема дозвуковой незамкнутой аэродинамической трубы

Вентилятор 7, приводимый во вращение электродвигателем 8, засасывает в трубу воздух через форкамеру 3 и сопло 4. Поток воздуха, пройдя спрямляющую решетку (хонейкомб) 1 и детурбулирующую сетку 2, становится плоскопараллельным и входит в рабочую часть 5, где установлена испытуемая модель. Из рабочей части поток попадает в диффузор 6 и затем выбрасывается в окружающее пространство.

В замкнутых аэродинамических трубах поток, пройдя рабочую часть и диффузор, направляется в обратный канал и через сопло вновь возвращается в рабочую часть. Этот поворот газового потока осуществляется в четырех коленах обратного канала. В этих коленах устанавливаются направляющие профилированные лопатки, которые плавно, с минимальными потерями, поворачивают поток и способствуют получению равномерного поля скоростей и давлений в рабочей части.

Для устранения закрутки потока вентилятором за его рабочим колесом устанавливается спрямляющий аппарат.

Форкамера служит для выравнивания и успокоения потока. В ней устанавливаются хонейкомб и детурбулирующие сетки.

Хонейкомб представляет собой сотообразную решетку, набранную из тонких металлических пластин. Его назначение — выравнивать скосы потока и разрушать крупные вихри.

Детурбулирующие сетки способствуют выравниванию поля скоростей и уменьшению начальной турбулентности потока в рабочей части трубы. Размеры форкамеры существенно влияют на равномерность

поля скоростей в рабочей части. Чем больше форкамера, тем равномернее поле.

Сопло служит для разгона потока воздуха от минимальной на входе до расчетной скорости на выходе в рабочую часть.

Поперечное сечение сопла может быть круглым, эллиптическим, прямоугольным, квадратным и восьмигранным.

Дозвуковые сопла имеют вид сужающихся каналов. Одной из важных характеристик дозвукового сопла является степень поджатия, равная отношению площадей на входе F_1 и на выходе F_0 : $n = F_1/F_0$. Высокая степень поджатия устраняет неравномерность скоростей и способствует снижению степени начальной турбулентности потока в рабочей части. Для современных труб степень поджатия колеблется от 5 до 20—25.

Рабочая часть — это пространство между соплом и диффузором. Здесь устанавливаются модели для испытания, здесь же располагаются аэродинамические весы. Газовый поток в рабочей части трубы должен иметь равномерное поле скоростей и давлений.

Открытая рабочая часть обеспечивает свободный доступ к модели и удобство наблюдений. Но для таких труб необходима дополнительная мощность на восполнение потерь, вызванных взаимодействием свободной струи с окружающим воздухом. В трубах замкнутого типа со скоростями до 100—150 м/с обычно применяют открытую рабочую часть.

В целях уменьшения потребной мощности привода для труб с большими скоростями применяют закрытую рабочую часть. Аэродинамические характеристики потока в трубе с закрытой рабочей частью выше, чем в трубе с открытой рабочей частью.

К недостаткам труб с закрытой рабочей частью следует отнести:

- а) трудность доступа при установке модели;
- б) сложность конструкции;
- в) необходимость тщательной герметизации этого пространства;
- г) усложнение конструкции аэродинамических весов.

Рабочая часть в виде герметической камеры имеет большие по сравнению с закрытой рабочей частью размеры, что в значительной мере упрощает установку моделей и ее обслуживание во время испытания.

Длина рабочей части в обычных трубах равна $1,5-2d$, а в трубах для испытания длинных тел она равна $2-4d$, где d — диаметр выходного сечения сопла.

Диффузор располагается непосредственно за рабочей частью. Он представляет собой специальным образом спрофилированный канал, который служит для уменьшения скорости потока и повышения давления.

Дозвуковой диффузор представляет собой расширяющийся вниз по течению канал, в котором происходит торможение потока. Наименьшие потери энергии у диффузоров с углом расширения $6-8^\circ$.

Привод аэродинамической трубы — это устройство, сообщаемое потоку газа необходимую энергию для получения расчетных скоростей в рабочей части трубы. Подвод энергии в дозвуковых трубах осуществляется с помощью низконапорных осевых вентиляторов, которые помещаются в цилиндрической вставке сразу за диффузором.

Важной характеристикой аэродинамической трубы является степень турбулентности потока, поскольку она оказывает большое влияние на аэродинамические характеристики испытываемых тел.

Степень турбулентности определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} (\Delta \bar{v}_X^2 + \Delta \bar{v}_Y^2 + \Delta \bar{v}_Z^2)}}{V_{\text{cp}}},$$

где $\Delta \bar{v}_X^2$; $\Delta \bar{v}_Y^2$; $\Delta \bar{v}_Z^2$ — средние значения квадрата турбулентных пульсаций компонент скорости в направлении осей координат X, Y, Z ; V_{cp} — средняя скорость потока.

В аэродинамических трубах обычно имеет место так называемая изотропная турбулентность, когда $\Delta \bar{v}_X^2 = \Delta \bar{v}_Y^2 = \Delta \bar{v}_Z^2$. В этом случае степень турбулентности

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\Delta \bar{v}_X^2}}{V_{\text{cp}}}.$$

Обычно ε выражается в процентах.

В случае осреднения по времени

$$V_{\text{cp}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v dt ;$$

$$\Delta v_x^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (v - V_{\text{cp}})^2 dt ,$$

где v — истинная скорость в рассматриваемой точке потока в данный момент времени; $t_2 - t_1$ — конечный промежуток времени.

Степень турбулентности в аэродинамических трубах колеблется от 1,75% (для старых труб) до 0,2 % (для новых труб).

Околосвуковые и трансзвуковые трубы. К трансзвуковым трубам относятся аэродинамические трубы, работающие в диапазоне чисел Маха $0,8 < M < 1,2$. Околосвуковые трубы в основном являются мощными дозвуковыми трубами замкнутого типа и постоянного дейст-

вия. Поток в них создается при помощи вентилятора. Скорость потока изменяется за счет изменения скорости вращения вентилятора или за счет изменения шага его лопастей.

Основное отличие околзвуковых труб от трансзвуковых состоит в конструкции стенок рабочей части: околзвуковые трубы имеют твердые (сплошные) стенки. При дозвуковых скоростях твердые стенки трубы препятствуют расхождению линий тока около модели, поэтому поле течения искажается.

Стенки трансзвуковой трубы не сплошные, они имеют щели и перфорации, которые ослабляют влияние стенок на форму линий тока вблизи модели.

Когда в рабочей части находится модель, то минимальное сечение получится в месте расположения модели.

При скорости $M = 1$ труба «запирается» в окрестности модели.

Явление «запирания» трубы состоит в том, что максимальная скорость потока достигается в месте наименьшего проходного сечения, образованного стенками трубы и моделью. За этим сечением появляются зоны местных сверхзвуковых скоростей, ограниченных скачками уплотнения.

Запирание можно определить по отношению давления торможения на оси модели к статическому давлению на стенке. Если оно равно 0,528, то это свидетельствует о том, что течение на стенках звуковое, — такое явление называется «запиранием» трубы, обусловленным стенкой.

Скорость потока в трансзвуковых трубах можно увеличить до $M \geq 1$ без угрозы запирания, так как перфорированные стенки не препятствуют изоэнтропическому расширению потока, обеспечивая так называемый «эффект расходного сопла», т.е. получение режимов $M > 1$ с дозвуковым соплом.

Сверхзвуковые трубы. Они работают в диапазоне чисел Маха $1,2 < M < 5$. Высокие скорости газового потока обеспечиваются сверхзвуковыми соплами.

Сверхзвуковые сопла имеют дозвуковой и сверхзвуковой участки. На дозвуковом участке воздух, поступающий из форкамеры, разгоняется до звуковой скорости. На сверхзвуковом участке происходит дальнейшее увеличение скорости и окончательное формирование равномерного сверхзвукового потока.

Каждое сверхзвуковое сопло рассчитано на получение определенного значения числа Маха на выходе, которое зависит от отношения площадей:

$$M = f \left(\frac{F_{кр}}{F_{соп}} \right).$$

Для получения нескольких значений числа Маха применяют сменные или регулируемые сопла. Такие сопла удобны в эксплуатации, но сложны в изготовлении. Применение регулируемых сопел удешевляет стоимость испытаний и увеличивает пропускную способность трубы.

Рабочая часть сверхзвуковых труб в большинстве случаев закрытая. Внутренние поверхности рабочей части тщательно полируются.

Сверхзвуковой диффузор состоит из двух частей: начального сужающегося канала и следующего за ним расширяющегося участка трубы. В сужающейся части диффузора сверхзвуковая скорость газа постепенно снижается до звуковой за счет образования скачков уплотнения, затем дозвуковой поток попадает в расширяющуюся часть канала, где происходит дальнейшее торможение потока. Так как торможение сверхзвукового потока в системе косых скачков осуществляется с меньшими потерями, чем в прямом скачке, то и сверхзвуковую часть диффузора профилируют так, чтобы торможение осуществлялось в системе косых скачков уплотнения.

Гиперзвуковые трубы. В этих трубах для получения потока с числом $M > 5$ необходимо в форкамере создать давление, превышающее давление в рабочей части в десятки тысяч раз, что обуславливает большие абсолютные значения давления в форкамере.

Получение необходимого перепада давлений можно обеспечить за счет разрежения в рабочей части, которое может быть достигнуто при помощи вакуум-камеры или применением многоступенчатого эжектора.

Если скорость потока в рабочей части трубы выше 4—4,5 М, то входящий из сопла воздух, расширяясь, настолько снижает свою температуру, что начинается его конденсация. Это явление можно устранить, используя в качестве рабочего газа, например, гелий, температура конденсации которого ниже, чем у воздуха, или же подогревая воздух установленным перед форкамерой трубы газовым или электрическим подогревателем.

Существуют аэродинамические трубы непрерывного и периодического действия.

По принципу работы трубы *периодического действия* бывают: атмосферно-вакуумные, эжекторные, баллонные, баллонно-вакуумные и баллонно-эжекторные.

Схема а т м о с ф е р н о - в а к у у м н о й трубы изображена на рис. 2.57.

В резервуаре 9 создается необходимое для работы разрежение. После открытия быстродействующей задвижки 8 атмосферный воздух устремляется в трубу через форкамеру 1, в которой установлены сетки и решетки 2, спрямляющие поток. В сопле 3 воздух, достигнув сверхзвуковой скорости с заданным числом Маха, поступает в рабочую часть 4, где установлен испытуемый объект 5, а затем через диффузор 6 и 7 — в вакуумный резервуар 9. При этом в течение короткого вре-

мени в рабочей части создается сверхзвуковой поток. Чтобы предотвратить конденсацию водяного пара в рабочей части, атмосферный воздух пропускают через осушитель.

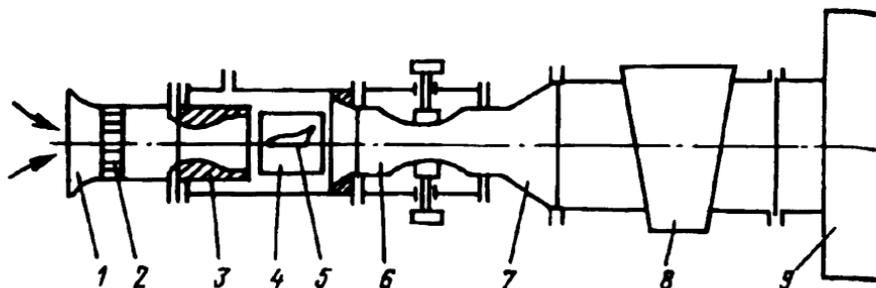


Рис. 2.57. Схема атмосферно-вакуумной сверхзвуковой трубы периодического действия

В эжекторной трубе (рис. 2.58) поток воздуха создается от эжектора (струйного насоса) 5, установленного за рабочей частью 3, к которому подается воздух повышенного давления. В ресивере 8 эжектора 5 создается повышенное давление. После открытия крана 7 воздух из ресивера 8 поступает в эжектор 5.

Эжектируемый воздух поступает в трубу из атмосферы, проходит через осушитель 1, сопло Лавала 2 и рабочую часть 3, где установлен объект 4, после чего, смешиваясь с эжектирующим воздухом, уходит через диффузор 6 в атмосферу.

Преимущества труб *периодического действия* заключаются в том, что они позволяют получать потоки с большим числом Маха при сравнительно небольших затратах мощности привода; число Рейнольдса может сохранить достаточно высокие значения, если в рабочей части трубы не создавать слишком больших разрежений.

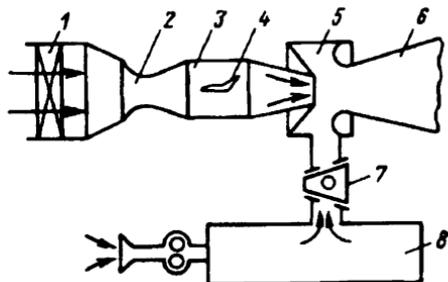


Рис. 2.58. Схема эжекторной сверхзвуковой трубы периодического действия

Однако действие таких труб настолько кратковременно, что получение количественных характеристик испытываемого объекта становится затруднительным.

Трубы *непрерывного действия* (рис. 2.59) лучше контролируются и точнее воспроизводят заданные параметры потока. Рабочие условия в них могут поддерживаться неизменными в течение длительного времени.

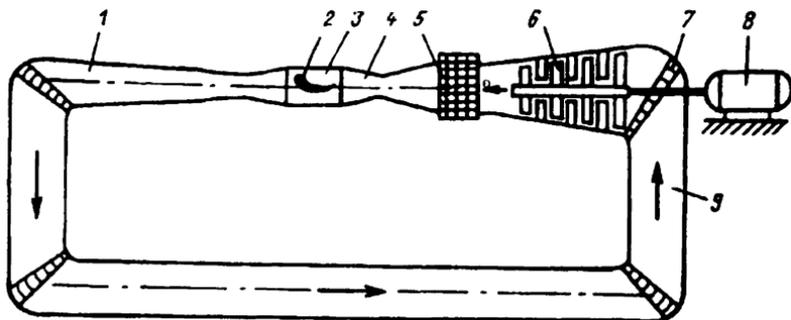


Рис. 2.59. Схема сверхзвуковой трубы непрерывного действия

Труба приводится в действие электродвигателем 8, на валу которого находится многоступенчатый компрессор 6, обеспечивающий высокий перепад давлений для работы трубы на сверхзвуковых скоростях. Воздух, пройдя компрессор, сильно нагревается. Поэтому в конструкции трубы предусмотрен охладитель 5, в который и направляется воздух. Охлажденный воздух, пройдя сопло Лавала 4, приобретает сверхзвуковую скорость и поступает в рабочую часть 3, где установлен объект 2, а затем через диффузор 1 и колено обратного канала 9 с поворотными лопатками 7 возвращается в компрессор.

Ударные трубы

Ударная труба представляет собой экспериментальную установку для исследования газодинамики и физики потоков с высокой температурой.

В простейшем виде ударная труба представляет собой закрытый с обоих концов длинный канал, разделенный диафрагмой на два неравных отсека (рис. 2.60).

В левый (малый) отсек под большим давлением (порядка сотен атмосфер) нагнетается толкающий газ. Толкающий газ за счет энергии

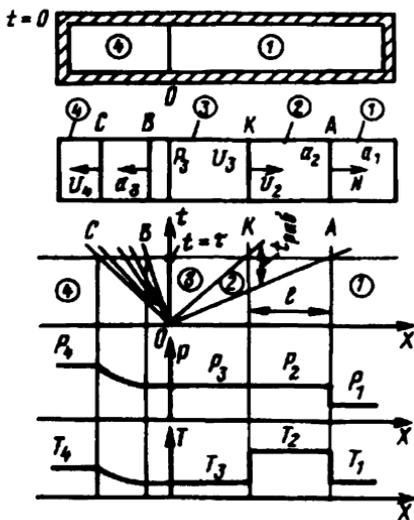


Рис. 2.60. Схема ударной трубы и ее волновая диаграмма

горения, электромагнитного поля, взрыва, движения поршня или просто перепада давления разрывает диафрагму и создает плоскую ударную волну во внутреннем канале трубы.

В правом отсеке, занимающем до 75% всей длины трубы, находится рабочий газ с низким давлением.

Вправо от точки разрыва диафрагмы по покоящемуся рабочему газу распространяется ударная волна OA с постоянной скоростью N . За ударной волной с постоянной скоростью u_2 движется контактная поверхность OK , разделяющая толкающий и рабочий газы.

Влево от точки разрыва диафрагмы по толкающему газу

распространяется центрированная волна разрежения, головной фронт которой OC движется со скоростью d_4 , а хвостовой фронт OB — со скоростью d_3 , причем $d_3 < d_4$, так как температура в зоне разрежения падает.

Этими волнами движение газа в трубе разделено на четыре области.

В области 1 рабочий газ с параметрами p_1, ρ_1, T_1 находится в покое ($u_1 = 0$).

В области 2 между ударной волной и контактной поверхностью располагается так называемая рабочая пробка с параметрами рабочего газа

$$p_2 > p_1; T_2 > T_1; \rho_2 > \rho_1.$$

Ее длина определяется выражением

$$l = (N - u_2)t,$$

где N — скорость распространения ударного фронта; u_2 — скорость распространения контактного разрыва.

Между контактной поверхностью и хвостовым фронтом волны разрежений располагается область 3 с параметрами толкающего газа

$$p_3 = p_2; \rho_3 = \rho_2; T_3 < T_2.$$

Эта область движется вслед за рабочей пробкой с той же скоростью $u_2 = u_3$.

Область 4 — область покоящегося толкающего газа с параметрами

$$p_4; \rho_4; T_4 > T_3; u_4 = 0.$$

Отообразим (см. рис. 2.62) расположение волн и значения параметров толкающего и рабочего газов в момент времени $t = \tau$ в координатах: X от t ; X от p ; X от T . Отсчет времени ведется с момента разрыва диафрагмы.

Когда ударная волна достигнет конца рабочего канала трубы, весь рабочий газ будет сжат, нагрет и приведен в движение в направлении перемещения ударной волны. Отразившись от конца трубы, ударная волна будет двигаться навстречу потоку и приводить его в состояние покоя, дополнительно нагревая и сжимая его. Достигнув контактной поверхности, ударная волна начинает многократное движение между стенкой и контактной поверхностью и тем самым сильно увеличивает температуру T_2 .

Для исследования обтекания тела высокотемпературным потоком используется течение в рабочей пробке. Продолжительность работы трубы $t_{\text{раб}}$ зависит от места расположения исследуемой модели. Чем дальше от диафрагмы расположена модель, тем больше длина рабочей пробки. Однако здесь имеются пределы, поскольку по мере удаления от диафрагмы интенсивность ударной волны вследствие трения уменьшается.

Обычная продолжительность рабочего времени трубы составляет от 0,1 до 1 мс.

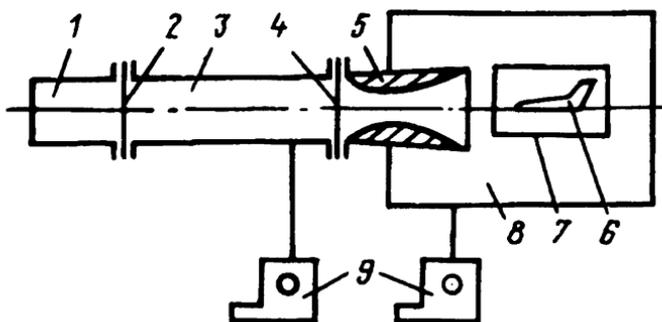


Рис. 2.61. Схема ударной аэродинамической трубы:

- 1 — отсек высокого давления; 2 — диафрагма; 3 — отсек низкого давления;
- 4 — диафрагма; 5 — сопло; 6 — модель; 7 — окно;
- 8 — вакуум-камера; 9 — вакуум-насосы

Эффективность ударной трубы при создании высоких температур связана со скоростью перемещения начальной ударной волны по рабочему газу, которая зависит от перепада начальных давлений в обоих отсеках трубы, скоростей звука в толкающем и рабочем газах в начальный момент и удельных теплоемкостей обоих газов.

Скорость ударной волны можно увеличить, если обеспечить больший перепад давлений толкающего и рабочего газов и выбрать легкие толкающие газы, в которых скорость звука больше. В мощных ударных трубах в качестве толкающего газа применяются водород и гелий.

Для повышения температуры в качестве толкающего газа используют смесь из кислорода и водорода, в которую для уменьшения возможности детонации добавляют гелий.

После воспламенения смеси, когда температура в отсеке высокого давления достигает $2\ 500^{\circ}\text{C}$, диафрагма разрушается при давлении, превышающем 10^8Па . Скорость ударной волны после разрыва диафрагмы достигает $15 - 18\text{ км/с}$, а температура за ней — около $16\ 000\text{ К}$.

Другой метод увеличения скорости ударной волны при заданном отношении давлений состоит в использовании схемы ударной трубы с двумя или несколькими диафрагмами. При разрыве первой диафрагмы ударная волна проникает в промежуточную камеру, заполненную, например, аргоном, а затем, после разрушения второй диафрагмы, волна проходит в рабочий газ. Увеличение скорости ударной волны достигается в этом случае за счет уменьшения времени установившегося потока.

Ударные трубы в основном применяются для получения высокотемпературного газа при исследовании физико-химических явлений, возникающих при полете, таких, как диссоциация и ионизация. Кроме того, в ударных трубах исследуют структуру ударной волны, воздействие ударных волн на преграды, отражение косых ударных волн и т.д.

Ударные трубы используются для создания *ударных аэродинамических стендов*.

В ударных аэродинамических трубах (рис. 2.61) газ в рабочей пробке разогревается до высоких температур, однако скорость его невелика. Скорость движения газа в рабочей пробке можно увеличить, если в ударной трубе на выходе из отсека низкого давления установить сопло Лавала.

Тогда модель можно испытывать в высокотемпературных газовых потоках со сверхзвуковыми скоростями порядка $20 - 25\text{ М}$ и выше.

Принцип работы трубы следующий: по достижении расчетного давления в отсеке 1 разрывается диафрагма 2 и газ устремляется в отсек 3. Образовавшаяся ударная волна распространяется по рабочему газу, нагревая и сжимая его. Когда волна достигнет конца отсека низкого давления, диафрагма 4 на входе в сопло разрушится — произой-

дет отражение ударной волны, а сжатый и разогретый газ за отраженной ударной волной истечет через сопло 5 в вакуум-камеру 8.

После встречи отраженной ударной волны с контактной поверхностью произойдет ее преломление и отражение, и эта волна возвратится к соплу. Начиная с этого момента, установившееся движение газа в сопле прекращается. Течение становится нестационарным, и работа трубы заканчивается.

В ударных аэродинамических трубах достигается давление торможения $2\,000 \cdot 10^5$ Па и температура торможения 8 000 К. Время работы около 6 мс.

Использование аэродинамических и ударных труб для изучения закономерностей движения тел при гиперзвуковых скоростях связано со следующими трудностями:

1. Необходимо создавать высокий перепад давлений рабочего газа на входе и выходе аэродинамической трубы. Так, например, при создании воздушного потока с $M = 20$ потери в трубе настолько велики, что отношение давлений на входе и выходе составляет порядка миллиона. При этом, чтобы поток был не слишком разреженным, т.е. чтобы значения Re были не слишком малы, в форкамере давление должно быть порядка сотен и даже тысяч атмосфер.

2. Необходимо предварительно подогревать газ, чтобы он при расширении в сопле не замерз, и для $M = 20$ $T_{\text{газ}}$ в форкамере должна быть равна 3 000 К.

Баллистические установки

В отличие от аэродинамических установок, на которых изучается взаимодействие потока с неподвижной и совершающей ограниченное движение моделью, баллистические установки дают возможность в лабораторных условиях проводить исследования тел в условиях свободного полета.

С появлением новой техники основными экспериментальными установками стали сверхскоростные баллистические установки с закрытой трассой.

На таких установках можно решать задачи о соударении твердых тел со скоростями до 100 км/с.

Баллистические установки имеют ряд преимуществ перед аэро- и гидродинамическими:

1. Широкий диапазон изменения чисел M и Re и возможность получения больших значений этих чисел.
2. Моделирование реальных температур торможения.
3. Отсутствие державок или креплений модели.
4. Невозмущенный набегающий поток.

5. Точный и надежный контроль параметров набегающего потока.
6. Возможность исследования нестационарных явлений.

К недостаткам баллистических стендов необходимо отнести следующие:

1. После каждого выстрела модель обычно разрушается.
2. Желаемое положение модели в потоке задается более сложным способом, чем в аэродинамической трубе.
3. Силы и моменты, действующие на модели, определяются расчетным путем по данным траекторных измерений.
4. Из-за малых размеров модели затруднено размещение внутри нее измерительных приборов.

Сущность аэродинамического баллистического эксперимента сводится к регистрации тем или иным методом координат летящих моделей непрерывно или в последовательных дискретных точках вдоль траектории.

Баллистические установки для аэро- и газодинамических исследований можно разбить на два типа:

1. Баллистические стенды, в которых исследуемая модель выстреливается в неподвижный воздух (открытые установки) или в камеру, в которой параметры газа могут изменяться (закрытые установки).
2. Установки, в которых модель выстреливается навстречу сверхзвуковому потоку аэродинамической трубы. Такие установки называются аэробаллистическими трубами.

Баллистические установки состоят из метательного устройства, сообщаящего моделям необходимую начальную скорость, и измерительного участка, на котором производится регистрация кинематических (пространственно-временных) характеристик полета модели. Измерительные участки различаются как по конструкции, так и по размерам. Длина их изменяется от одного метра до нескольких километров. На выходе измерительного участка баллистической установки помещают системы торможения и улавливания моделей.

По принципу разгона модели метательные устройства, применяемые при высокоскоростном метании, могут быть разделены на два класса: газодинамические установки, в которых модель разгоняется газом; электродинамические установки, в которых модель разгоняется под действием электромагнитных сил.

Газодинамические устройства по конструктивному принципу делятся на одноступенчатые и многоступенчатые.

В одноступенчатых устройствах энергия к рабочему газу подводится непосредственно, или за счет горения, или за счет электрического разряда.

В многоступенчатых устройствах энергия подводится к рабочему газу через промежуточные ступени.

В современных баллистических установках применяются главным

образом пороховые и легкогазовые метательные устройства. Их обычно называют пороховыми и легкогазовыми пушками.

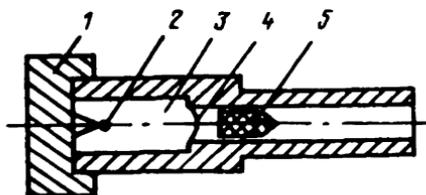
В пороховых пушках используется нитроглицериновый порох. Поэтому максимально достижимые скорости на срезе ствола ограничены максимальной скоростью звука в продуктах сгорания пороха и весом газов, которые должны ускоряться вместе со снарядом при движении вдоль ствола. Предельная скорость метания в пороховых пушках не превышает 3 км/с.

В легкогазовых пушках для разгона снаряда применяются легкие газы (водород и гелий), скорость звука в которых значительно больше, чем в пороховых газах. С помощью легкогазовых пушек моделям могут быть сообщены относительные скорости, превышающие 10 — 12 км/с. В настоящее время применяются легкогазовые пушки двух типов: одноступенчатые и двухступенчатые.

В одноступенчатой легкогазовой пушке (рис. 2.62) камера сгорания заполняется смесью газов (кислородно-водородно-гелиевая смесь). После воспламенения смеси давление достигает расчетного значения, происходит разрыв диафрагмы, отделяющей камеру сгорания от объекта, газ устремляется в ствол пушки и разгоняет объект до высокой скорости. На таких установках достигается скорость метания 3,5 — 4 км/с.

Рис. 2.62. Схема одноступенчатой газовой пушки:

1 — гайка казенной части; 2 — воспламенитель; 3 — камера, заполненная кислородно-водородно-гелиевой смесью; 4 — диафрагма; 5 — испытуемый объект



Многоступенчатые газодинамические метательные устройства принципиально отличаются от пороховых пушек тем, что в них введены дополнительные ступени для подогрева и сжатия рабочего легкого газа (рис. 2.63). После воспламенения пороха в камере 1 пороховые газы разгоняют до сверхзвуковых скоростей поршень 8, который движется в камере 7, заполненной легким газом. Ударная волна, возникающая перед поршнем, нагревает и сжимает рабочий газ. Когда температура и давление в камере 7 достигнут расчетных величин, диафрагма 3 разрывается, а сжатый и разогретый газ устремляется в ствол пушки и разгоняет объект до высокой скорости. Поршневые установки бывают с низкой степенью сжатия ($p_{\max}/p_0 = 100$) и с высокой степенью сжатия ($p_{\max}/p_0 = 1000$). Здесь p_{\max} — давление, допускаемое в установке, p_0 — начальное давление легкого газа.

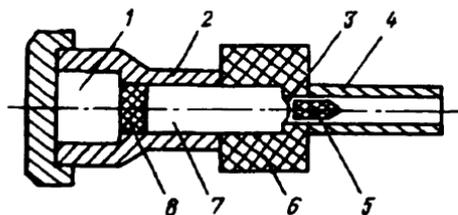


Рис. 2.63. Схема двухступенчатой газовой пушки:
 1 - пороховая камера; 2 - труба;
 3 - диафрагма; 4 - ствол;
 5 - снаряд; 6 - секция одноразового действия; 7 - камера, заполненная легким газом; 8 - поршень

В установках с $p_{\max}/p_0 = 100$ скорость метания не превышает 4 км/с, в установках с $p_{\max}/p_0 = 1000$ $V_{\text{мет}} = 6 \div 7$ км/с.

Выстреливая модель в барокамеру, заполненную воздухом или газом с регулируемым давлением и температурой, можно смоделировать течение около объекта, движущегося с относительной скоростью 10 ÷ 12 км/с.

На аэробаллистических установках (рис. 2.64) достигаются скорости с числами $M = 83$ и перегрузками до 10^6 .

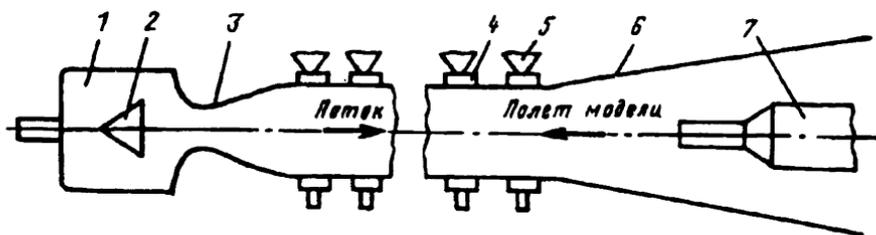


Рис. 2.64. Схема аэробаллистической установки:
 1 - форкамера; 2 - устройство, улавливающее модель; 3 - сопло;
 4 - цилиндрическая часть; 5 - регистратор движения модели;
 6 - диффузор; 7 - газовая пушка

С целью предохранения моделей от разрушения при движении в канале ствола модели вставляются в предохраняющие обкладки, называемые поддонами. При выходе из ствола поддоны отделяются от модели.

Для определения параметров траектории модели, по которым затем рассчитываются аэродинамические характеристики, производится фотографирование положений модели в нескольких точках траектории при одновременном измерении времени между экспозициями. Совпадение моментов экспонирования с моментами нахождения модели в поле фотографирования обеспечивается применением электронных и радиолокационных систем синхронизирования.

2.2.6.

Испытания на воздействие акустических нагрузок

В последние десятилетия на стыке двух наук — аэродинамики и акустики — образовалось новое научное направление — аэроакустика. Аэроакустика изучает проблемы аэродинамической генерации звука, его распространения и снижения шума.

Акустические испытания, т.е. испытания на воздействие шума (звукового давления), выделяются в специальный вид испытаний.

Акустические испытания могут преследовать две различные цели:

1. Изучение восприимчивости исследуемых систем к воздействию звукового давления, т.е. способности систем эффективно реагировать на воздействие основных нагрузок (например, исследование характеристики демпферов, гасящих пульсации в бортовых системах).

2. Определение фактической устойчивости или усталостной прочности и долговечности элементов конструкции под воздействием интенсивных акустических нагрузок.

Воспроизведение действительных условий нагружения при акустических испытаниях представляет собой сложную задачу, так как акустические нагрузки имеют случайный характер и изменяются в весьма широком диапазоне частот. Создание универсального стенда, воспроизводящего весь комплекс акустических нагрузок, оказалось практически неосуществимым. Поэтому при наземных испытаниях имитируются наиболее важные режимы нагружения. При этом предполагается, что, несмотря на физическое различие между искусственным шумом (на стенде) и шумом РД, пульсациями давления в турбулентном пограничном слое в зонах отрывных аэродинамических возмущений и колеблющимися ударными волнами, они вызывают сходную вибрационную реакцию конструкции.

При проектировании установок акустического нагружения и разработке методик испытаний решаются следующие основные задачи:

1. Разрабатываются источники интенсивного шума.

2. Формируется требуемое акустическое поле вокруг объекта испытаний.

3. Разрабатываются измерительные системы.

Общие требования к акустическим стендам, предназначенным для испытаний конструкций ЛА и его элементов, сводятся к следующему:

— необходимо воспроизводить уровни акустических нагружений, близкие к эксплуатационным;

— параметрический ряд стендов должен обеспечивать проведение прочностных, контрольных и сертификационных испытаний как элементов, узлов и агрегатов ЛА, так и его систем и изделия в целом;

— стенды должны позволять воспроизводить случайные широкополосные и узкополосные процессы акустического нагружения с заданной формой спектра в полосе частот 20 — 2000 Гц, а также создавать заданное распределение уровней звука на облучаемой поверхности;

— как управление процессом нагружения объекта испытаний, так и сбор и обработка получаемой информации (звукового давления, вибраций, напряжения) должны быть автоматизированы. В условиях действия звукового давления в диапазоне от 150 до 170 дБ и выше в конструкции ЛА возникают значительные напряжения, которые могут вызвать усталостное разрушение после даже кратковременного нагружения.

Наиболее распространенный вид усталостных повреждений обшивки от акустических воздействий — разрушение отдельных панелей, оболочек и подкрепляющих элементов, особенно в местах значительной концентрации напряжений вблизи заклепочных швов и отверстий.

В натуральных условиях элементы конструкции ЛА подвергаются интенсивному акустическому нагружению на трех основных этапах: 1) старт; 2) выход на трансзвуковую скорость при подъеме; 3) спуск и торможение ЛА в плотных слоях атмосферы на этапе старта.

Мощное акустическое поле возникает от высокотемпературных струй газа, истекающих из реактивных двигателей, которые взаимодействуют с окружающей средой и с частями наземного комплекса.

Шум от РД возникает в результате колебаний давления у пограничных слоев в результате взаимодействия высокоскоростной струи газа и окружающего воздуха.

Для определения звуковой мощности реактивной струи в зависимости от скорости истечения струи можно использовать следующие зависимости:

Для $M < 0,5$

$$W = k_0^1 \frac{\rho^2 v^6}{\rho_0 a_0^5} D^2,$$

где k_0^1 — коэффициент пропорциональности, который растет с увеличением скорости истечения.

Для $0,5 < M \leq 1$

$$W = k_0^1 \frac{\rho^2 v^8}{\rho_0 a_0^5} D^2,$$

где $k_0 = (2,5; \dots; 4,5) \cdot 10^{-5}$.

Для $M = 2,0 + 3,5$

$$W = 6 \cdot 10^{-3} \frac{\rho^2 v^3}{\rho_0} D^2.$$

Здесь ρ — плотность газового потока струи; V — скорость истекающей струи относительно окружающего воздуха; ρ_0 — плотность окружающей среды; a_0 — скорость звука в окружающей среде; D — диаметр сопла.

Из приведенных зависимостей видно, что интенсивность шума истекающей струи максимальна при работе двигателя на земле, когда скорость течения газов относительно окружающего воздуха достигает наибольшего значения.

С возрастанием скорости движения ЛА интенсивность акустического поля давления от реактивных двигателей на поверхности его корпуса снижается. Снижается и общий уровень вибраций элементов конструкции. Затухают низкочастотные упругие колебания ЛА, вызванные резким выходом двигателей на режим.

С другой стороны, по мере роста скоростного напора повышается интенсивность вибраций, обусловленных пульсацией внешнего аэродинамического давления.

На поверхности ЛА под турбулентным пограничным слоем наблюдается случайное по пространству и времени поле интенсивных пульсаций давления звукового диапазона частот. Уже сама турбулентность пограничного слоя в сжимаемом потоке является источником излучения звуковой энергии. Однако интенсивность пульсаций давления на обтекаемой поверхности за счет акустического излучения турбулентности даже при больших числах Маха существенно меньше интенсивности псевдозвуковых пульсаций давления. Эти пульсации давления и являются основными источниками шума от пограничного слоя. Зависимости статистических характеристик пульсаций давления в турбулентном пограничном слое от аэродинамических параметров получают на основании результатов экспериментальных исследований. Указанные пристеночные пульсации давления относятся к случаю установившегося развитого турбулентного пограничного слоя на гладкой поверхности при нулевом продольном градиенте давления.

Небольшой отрицательный градиент давления приводит к сильному уменьшению высокочастотных составляющих пульсаций давления, практически не оказывая влияния на низкочастотные пульсации давления.

Положительный градиент давления (не приводящий к отрыву пограничного слоя) вызывает рост низкочастотных составляющих, при этом не изменяются высокочастотные составляющие спектра, из-за чего увеличивается среднеквадратичное значение пульсаций давления в турбулентном пограничном слое.

Наличие выступающих элементов при большом положительном градиенте давления приводит к срыву потока. В зонах отрыва наблюдаются интенсивные пульсации давления, превышающие пульсации давления в невозмущенном пограничном слое в 4—5 раз.

Возмущения турбулентного пограничного слоя возникают из-за появления скачков уплотнения и их интерференции. В области присоединения скачков наблюдается увеличение пристеночных пульсаций давления по мере роста интенсивности скачка уплотнения. Шероховатость поверхности приводит к значительному увеличению пульсаций давления в турбулентном пограничном слое по сравнению со случаем гладкой обтекаемой поверхности.

В этих случаях среднеквадратичное значение пульсаций давления на поверхности ЛА за счет шероховатости может возрасти почти на порядок для гладкой поверхности.

Среднеквадратичное значение пульсаций давления зависит от скоростного напора:

$$(\bar{q}^2)^{1/2} = \eta_a q_* = \eta_a \frac{\rho_0 V_0^2}{2},$$

где η_a — коэффициент пропорциональности (характеризует эффективность превращения кинетической энергии потока в энергии пульсационного давления); q_* — скоростной напор.

Для установления условий акустического подобия аэродинамических потоков необходимо рассмотреть основное волновое уравнение, описывающее источники шума аэродинамического происхождения и распространения звука от этих источников:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - a_0^2 \frac{\partial^2 p}{\partial X_i^2} = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial F_i}{\partial X_i} + \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial X_i \partial X_j}, \quad (2.73)$$

где $Q = \rho V/D$ — производительность источника массы за единицу времени на единицу объема; D — линейный размер источника; $F = \rho g$ — массовая сила, действующая на единицу объема; T_{ij} — тензор Лайтхилла, представляющий собой разность напряжений в потоке и в покоящейся среде

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + \left(p \delta_{ij} - \eta \frac{\partial v_i}{\partial X_j} \right) - a_0^2 \rho \delta_{ij},$$

где a_0 — скорость звука в невозмущенной среде; η — коэффициент сдвиговой вязкости (динамической вязкости); p — давление; ρ — плотность среды; V — скорость потока.

Структура этого дифференциального уравнения не зависит от изменения масштабов величин, входящих в него. Изменение масштабов может лишь привести к появлению численных коэффициентов при всех членах. Полагая, что уравнение (2.73) записано для натурального объекта, перепишем его для модели при условии, что все линейные

размеры при переходе от натурального объекта к модели изменяются в D раз, время — в t раз и т.д.:

$$X = X_1 D; t = t_1 t_0 = \frac{t_1}{f}; \rho = \rho_1 \rho_0; Q = Q_1 Q_0$$

и т.д.

В этом случае уравнение (2.73) примет вид

$$f^2 \rho_0 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} - \frac{\rho_0 a_0^2}{D^2} \left(a_0 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial X_{1i}^2} \right) = f Q_0 \frac{\partial Q_1}{\partial t_1} - \frac{F_0}{D} \frac{\partial F_1}{\partial X_{1i}} + \left(\frac{\rho_0 v_0^2}{D^2} + \frac{P_0}{D^2} - \eta \frac{v_0^2}{D^3} - \frac{\rho_0 a_0^2}{D^2} \right) \frac{\partial^2 T_{1i}}{\partial X_{1i}^2}.$$

Используя выражения для Q и F , запишем уравнение в другой форме:

$$\left(\frac{fD}{v_0} \right)^2 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t_1^2} - \left(\frac{a_0}{v_0} \right)^2 \left(a_0^2 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial X_{1i}^2} \right) = \frac{fD}{v_0} \frac{\partial Q_1}{\partial t_1} - \frac{gD}{v_0^2} \frac{\partial F_1}{\partial X_{1i}} + \left(1 + \frac{P_0}{\rho_0 v_0^2} - \eta \frac{1}{\rho_0 v_0 D} - \frac{a_0^2}{v_0^2} \right) \frac{\partial^2 T_{1ij}}{\partial X_{1i}^2}$$

или

$$\text{Sh}^2 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t_1^2} - \frac{a_0}{a^2 M^2} \left(a_0^2 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial X_{1i}^2} \right) = \text{Sh} \frac{\partial Q_1}{\partial t_1} - \frac{1}{\text{Fr}} \frac{\partial F_1}{\partial X_{1i}} + \left(1 + \text{Eu} - \frac{1}{\text{Re}} - \frac{a_0^2}{a^2 M^2} \right) \frac{\partial^2 T_{1ij}}{\partial X_{1i}^2}. \quad (2.74)$$

Здесь введены принятые в аэродинамике безразмерные параметры — критерии подобия: число Струхала $\text{Sh} = fD/v_0$; число Маха $M = v_0/a$; число Рейнольдса $\text{Re} = v_0 D/\nu$; число Фруда $\text{Fr} = v_0^2/gD$; число Эйлера $\text{Eu} = P_0/\rho v_0^2$; a — скорость распространения звука в потоке; $\nu = \mu/\rho_0$ — кинематическая вязкость; f_0 — частота.

Из сравнения коэффициентов при первом и втором членах уравнения (2.74) имеем дополнительный критерий:

$$\frac{fD}{a_0} = \frac{D}{\lambda} = \text{const} .$$

Представим в уравнении (2.73) выражение для силы F , действующей на тело (например, профиль винта), помещенное в поток:

$$dF = \frac{\rho \Gamma}{b} v (1 - \eta \operatorname{tg} \beta) dr ,$$

где Γ — циркуляция потока; v — скорость натекания потока на профиль; β — угол натекания потока; b — хорда профиля; η — качество профиля.

В этом случае безразмерный коэффициент для четвертого члена уравнения (2.74) примет вид

$$\frac{\Gamma}{aD} \left(\frac{D}{b} \right) \frac{w}{a} \left(\frac{a^2}{v_0^2} \right) (1 - \eta \operatorname{tg} \beta) = \frac{\Gamma}{b} \frac{M_{\text{вх}}}{M^2} (1 - \eta \operatorname{tg} \beta) , \quad (2.75)$$

где Γ — безразмерная циркуляция; b — безразмерная хорда профиля; $M_{\text{вх}}$ — число M на входе профиля.

Наряду с волновым уравнением (2.73) можно рассмотреть уравнение состояния и энергии. В этом случае к полученным критериям добавятся критерий Прандтля Pr . Следовательно, для сохранения аэроакустического подобия турбулентных потоков должны сохраняться: критерии подобия потоков (Sh ; M ; Re ; Fr ; Pr ; a/a_0 ; D/λ); геометрическое подобие тел, помещенных в поток (b ; η ; $\beta = \text{const}$); подобие распределения аэродинамической нагрузки на поверхности тела ($\Gamma = \text{const}$). При соблюдении этих условий моделирование уровни звукового давления в геометрически подобных точках модели и натурального объекта будут равны.

На практике проводят так называемое частичное моделирование, поскольку полное моделирование сопряжено со значительными техническими сложностями.

Для сокращения числа критериев подобия есть следующие основания:

— при больших числах Re течение становится автомодельным; кроме того, рейнольдсовы напряжения в турбулентных потоках значительно выше вязких напряжений, поэтому действием вязкости можно пренебречь;

— так как число Pr для газов близко к единице, им тоже можно пренебречь;

— для свободных турбулентных потоков можно также пренебречь действием сил тяжести и давления, т.е. критерии Fr и Eu можно не учитывать.

При моделировании необходимо осуществлять подобие начальных и граничных условий.

Граничные условия при распространении звука в канале с потоком:

$$\frac{\partial P_1}{\partial r_1} - ikGD P_1 \left(1 - M \frac{kX}{k} \right)^2 = 0, \quad (2.76)$$

где $D = 2r$ — высота канала; $G = \rho a / z$ — проводимость стенки; z — импеданс.

Из выражения (2.76) следует, что $kDG = \text{const}$;

$$\frac{z}{\rho a} \frac{1}{D/\lambda} = \frac{\bar{z}}{D/\lambda} = \text{const}. \quad (2.77)$$

Таким образом, безразмерные импедансы стенок тела модели и натурального объекта должны быть равны при одинаковых безразмерных частотах звуковых колебаний. Соблюдение равенства начальных параметров потоков в модели и в натуральных условиях требует практически равенства начальных параметров турбулентных потоков.

В результате проведенного анализа можно констатировать, что при аэроакустическом моделировании должны быть выдержаны следующие критерии подобия:

- 1) геометрический;
- 2) M ; Sh ; a/a_0 ; $D/\lambda = \text{const}$;
- 3) аэродинамическая нагрузка на тело;
- 4) $\bar{z}/D/\lambda = \text{const}$ на границе поверхности;
- 5) начальная турбулентность потоков.

Звуковое поле создается в испытательных боксах, реверберационных камерах и каналах бегущей волны.

Принципиальная схема бокса для проведения акустических испытаний показана на рис. 2.65.

Испытуемые изделия 4 располагают вокруг струи 3, истекающей из сопла реактивного двигателя 1 на монтажной раме 5. Для сброса газов за рабочим участком расположен диффузор 2. Параметры звукового поля и реакции панелей обшивки контролируют при помощи микрофонов и тензорезисторных датчиков.

Как видно из схемы, интенсивным источником шума является выхлопная струя реактивного двигателя. Так, вблизи среза выхлопного сопла уровни шума составляют приблизительно 160 — 175 дБ. Такое интенсивное акустическое излучение реактивных струй связано с неоднородностью структуры турбулентного потока и может рассматриваться как результат взаимодействия нестационарных объемов жидкости или турбулентных вихрей.

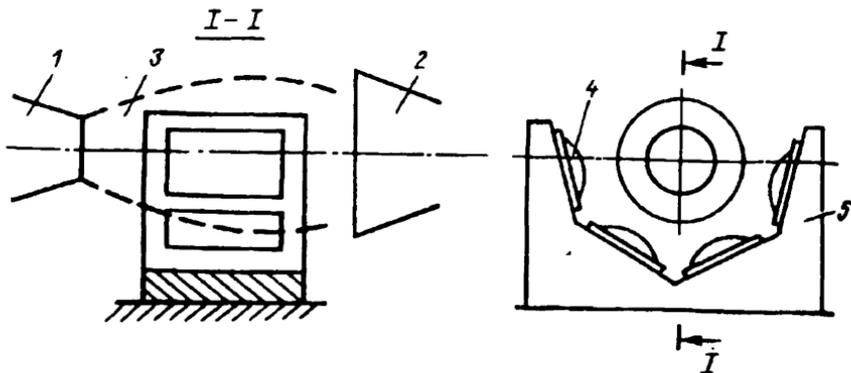


Рис. 2.65. Схема бокса при акустических испытаниях

1. Акустическую мощность турбулентной струи определяют по формуле

$$W = k_0 \frac{\rho_0^2 v_0^8 D^2}{\rho_0 v_0^5},$$

где $k_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ для модельных струй; $k = 1,5 \cdot 10^{-4}$ для натуральных струй; ρ_c — плотность среды в струе; v_c — скорость истечения; D — диаметр среза выхлопного сопла; ρ_0 и v_0 — соответственно плотность и скорость распространения звука в окружающей среде.

2. Уровень суммарного шума в точке звукового поля, расположенной на расстоянии r от среза сопла под углом Θ к оси струи, определяют по выражению

$$L = 10 \lg W + 10 \lg \Phi - 10 \lg 4\pi r^2 + 120 - \Delta.$$

Фактор направленности $10 \lg \Phi$, который представляет собой разность между измеренным уровнем шума и уровнем шума в той же точке от фиктивного источника такой же мощности, как и исследуемый источник, но излучающего звук равномерно во всех направлениях, определяют в соответствии с температурой T и числом M струи; Q — угол между осью струи и направлением измерения шума; Δ — поправка, учитывающая влияние скорости полета ЛА: $\Delta = -10n \lg [v_0 / (a_c - v_0)]$; v_0 — скорость спутного потока.

Значение коэффициента n зависит от угла наблюдения Q (табл. 2.4).

ЗАВИСИМОСТЬ n ОТ Q

Q^0	30	50	70	90	100
n	9	4,5	1	-1	-2,5

В реверберационных камерах происходит отражение звука от стенок камеры, и звуковое поле вокруг объекта испытаний представляет собой интерференционную картину звуковых волн, т.е. возникает эффект резонансного усиления колебаний среды.

Реверберационная камера представляет собой помещение, стены которого оштукатурены с последующим железнением их и покраской тонким слоем. Толщина стен может достигать 80 см при уровне шума 170 дБ. В другом варианте стены реверберационной камеры могут быть облицованы плиткой. Такое помещение почти полностью (99%) отражает звуковые волны. В результате этого в камере создается диффузное звуковое поле, т.е. поле, в котором все направления равнозначны и уровни звукового давления одинаковы в любой точке камеры.

Размеры камеры выбирают в соответствии с размерами объекта испытаний. В среднем объем реверберационной камеры должен превышать объем испытуемого образца не менее чем в 8 раз.

Для того чтобы акустическое поле было более равномерным, камеры относительно небольших объемов (менее 1000м^3) строят с непараллельными стенками, что способствует улучшению условий реверберации звука. Угол скоса противоположных поверхностей относительно друг друга $5 \div 10^0$.

Камеры большого объема (более 1000м^3) обычно делают прямоугольными. Для повышения диффузности поля в таких камерах иногда применяют рассеиватели — жесткие клинья, устанавливаемые на внутренних поверхностях камер. Ориентировочно объем реверберационной камеры можно определить из условия обеспечения нижнего частотного диапазона измерений по формуле

$$f_n = 125 \sqrt{\frac{180}{V}},$$

где V — объем камеры; f_n — нижняя граничная частота.

Более точный расчет размеров реверберационной камеры (длины d , ширины b и высоты h) производят по формулам:

$$d = \frac{\lambda}{4} + 2l_{\max} + \sqrt{2^2 - (\lambda/4)^2} ;$$

$$b = \frac{6\lambda}{4} ;$$

$$h = 2 \sqrt{2^2 - (\lambda/4)^2} ,$$

где λ — длина волны нижней граничной частоты; l_{\max} — максимальный размер испытываемого образца.

Правильность выбранных размеров камеры оценивается исходя из удовлетворения условия

$$r \geq \sqrt{\frac{A}{5}} ,$$

где r — расстояние от источника шума до измерителя шума; A — общая площадь звукопоглощения для нижней граничной частоты; $A = \alpha S$; S — площадь ограждающих поверхностей камеры; α — коэффициент звукопоглощения для нижней граничной частоты измерений.

В реверберационных камерах, как правило, испытывают полноразмерные конструкции ЛА. Генераторы звукового давления устанавливаются в разных местах внутри камеры или могут быть установлены вне камеры. Уровень шума, достигаемый в таких камерах, составляет 177 дБ. Управляемый спектр шума — от 40 до 1250 Гц, общий спектр шума — от 40 до 10 000 Гц. Такие камеры позволяют намного снизить требуемую акустическую мощность, а также практически избежать воздействия сильного шума на обслуживающий персонал. Уровень шума около камеры имеет значение порядка 50 дБ.

Известные реверберационные камеры имеют объемы 50 — 5000 м³. Наблюдается тенденция к еще большему увеличению объема камер.

В состав реверберационных камер входят (рис. 2.66):

- испытательный бокс;
- препаратурская;
- система генераторов звука;
- согласующие устройства (рупоры);
- система питания генераторов звука сжатым воздухом;
- система формирования и управления спектрами акустической нагрузки;
- информационно-измерительная система;
- шумоглушитель для вывода рабочего тела звуковых генераторов.

При конструировании реверберационных камер суммарная акустическая мощность источников шума в соответствующих частотных по-

лосах должна быть распределена на минимальное количество согласующих устройств (рупоров). При этом должна достигаться высокая эффективность излучения звука рупором, условием выбора геометрических размеров которого является

$$d \geq \frac{a}{f_{кр}\pi},$$

где d — размер выходного сечения рупора; a — скорость звука; $f_{кр}$ — критическая частота рупора, ниже которой эффективность излучения резко падает.

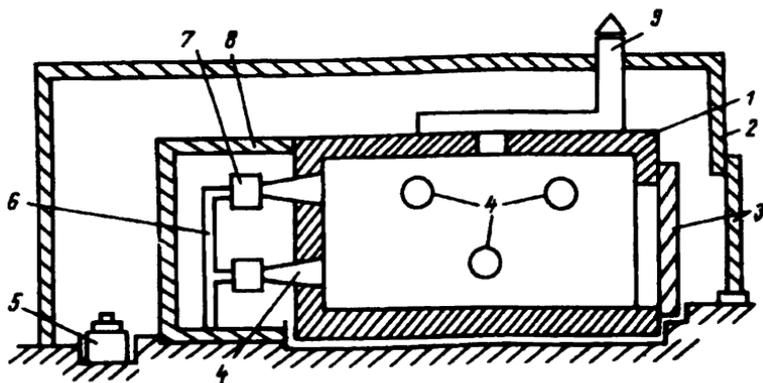


Рис. 2.66. Схема реверберационной камеры:

- 1 — испытательный бокс; 2 — корпус камеры; 3 — ворота; 4 — рупоры сирен;
5 — вибростенд; 6 — воздуховод; 7 — сирены; 8 — бокс генераторов звука;
9 — выхлопная труба

Наибольшая эффективность излучения звука у экспоненциального рупора.

При этой форме поперечное сечение рупора увеличивается на одинаковую процентную величину через каждую единицу его осевой длины. Это приращение определяет нижнюю граничную частоту рупора.

На рис. 2.67 представлена зависимость процентного приращения поперечного сечения на 1 см осевой длины от нижней граничной частоты. Так, например, чтобы получить нижнюю граничную частоту 60 Гц, площадь поперечного сечения рупора надо увеличивать на 2% через каждый сантиметр его осевой длины. Эту зависимость можно представить и в виде формулы

$$f_{гр} = 6,25 \cdot 10^3 \lg(0,01K + 1),$$

где K — приращение площади поперечного сечения, %.

Для приращений K , меньших 20%, и, следовательно, для граничных частот, меньших 500 Гц, формула может быть представлена в следующем виде:

$$f_{гр} = 27K.$$

В рупоре круглого или квадратного сечения диаметр круга или сторона квадрата должны увеличиваться на каждый сантиметр длины рупора на $\sqrt{K}\%$. В рупоре прямоугольного сечения с постоянной высотой ширина сечения должна увеличиваться на $K\%$ на каждый сантиметр длины рупора.

Для хорошего воспроизведения низких частот нужно также обеспечивать достаточные размеры выходного отверстия рупора — устья. Его диаметр должен быть не менее $\lambda_{гр}/\pi$. Следовательно, для нижней граничной частоты 100 Гц, для которой длина волны составляет 3,4 м, диаметр устья должен быть около 110 см. Для более низких граничных частот размеры устья рупора будут еще больше. В области низких частот в полосе $25 \leq f \leq 100$ Гц более эффективным является катеноидальный рупор.

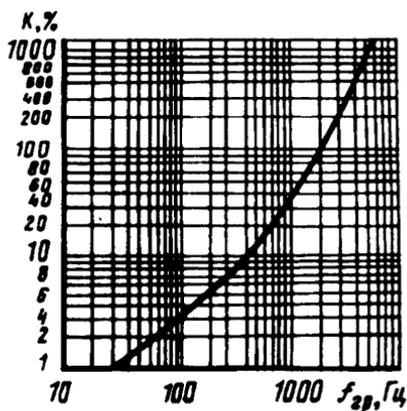


Рис. 2.67. Зависимость процентного приращения площади поперечного сечения рупора на 1 см его осевой длины от нижней граничной частоты

Расчет рупора следует начинать, задавшись размерами устья выбранной нижней граничной частоте, уменьшая сечение на $K\%$ на каждый сантиметр осевой длины до тех пор, пока не получим сечение, равное площади диффузора или диафрагмы звукового генератора. При этом в месте сопряжения сечения звукового генератора и рупора должны иметь одну форму. Если же форма сечения рупора отличается от формы выходного отверстия звукового генератора, то сопряжение осуществляется с помощью промежуточной камеры. Интенсивность акустического поля в камере зависит от места расположения ис-

точников звука. При расположении источника на стене камеры средняя интенсивность звука в два раза, а при установке в углу — в четыре раза выше, чем при установке его в центре.

Для повышения равномерности звукового поля в камере прямоугольной формы рекомендуется брать следующие соотношения линейных размеров:

$$l_x = 1; l_y = \sqrt[3]{2l_x}; l_z = \sqrt[3]{4l_x}.$$

Так как в подобных камерах звуковые нагрузки обычно имеют широкополосные спектры частот с неравномерной спектральной плотностью, на стендах необходимо создавать согласованное (программное) управление генераторами, формирующими спектр звуковых давлений. Это осуществляется при помощи многоканальной управляющей системы (рис. 2.68).

Исходный сигнал звукового давления задается генератором белого шума 8, имеющего полосу частот 20 Гц — 20 кГц. Из этой широкой полосы при помощи фильтров устройства 9 выделяют ряд более узких полос, чаще всего 1/3-октавных. В каждой из полос уровень сигнала может регулироваться в пределах 40 — 60 дБ. Просуммированный на выходе фильтров формируемый сигнал поступает в параллельно

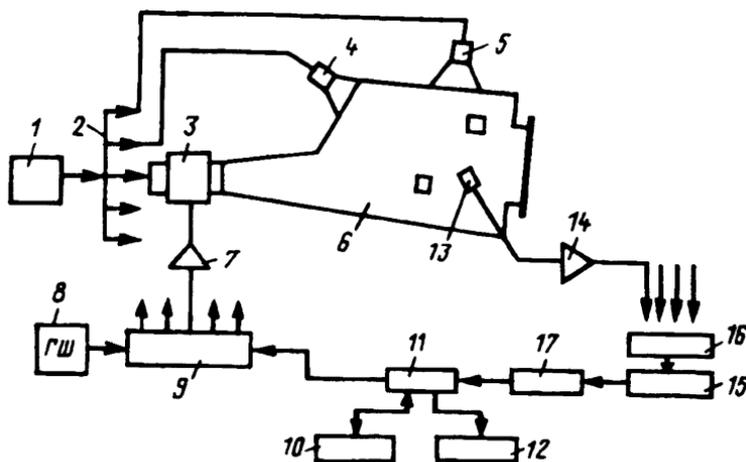


Рис. 2.68. Схема многоканальной управляющей системы:

- 1 - источник питания сирен сжатым воздухом; 2 - воздухораспределительные устройства; 3, 4, 5 - сирены; 6 - бокс-камеры; 7 - усилитель мощности сирены; 8 - генератор шума; 9 - устройство формирования спектра; 10 - стойка управления; 11 - ЭВМ; 12 - графопостроитель; 13 - микрофоны; 14 - микрофонный усилитель; 15 - анализатор спектра; 16 - коммутатор; 17 - детектор

включенные усилители мощности генераторов звука — сирен 3, 4, 5, создающих акустическое поле в боксе камеры 6.

В каждом генераторе шума предусмотрен независимый канал управления сжатия воздухом, включающий обычные для воздухораспределительных систем устройства: электродвигатель, дроссель, регулятор давления, воздушный фильтр, ресивер.

В качестве датчиков обратной связи в системе регулирования используют микрофоны 13, устанавливаемые в контрольных точках бокса. Для ввода в систему регулирования сигналы, поступающие от микрофонов, усиливаются и усредняются и, пройдя коммутатор 16, поступают в полосовой анализатор спектра 15, аналогичный по составу анализатору устройства 9. Пройдя среднеквадратичный детектор 17, уровни сигнала в полосах с помощью мини-ЭВМ сравниваются с заданными уровнями, в результате чего вырабатывается сигнал коррективы, поступающий на усилители задающих фильтров устройства 9, благодаря чему автоматически поддерживается уровень звукового давления в камере.

Достаточно хорошее приближение к заданным характеристикам акустического нагружения можно получить при использовании десяти микрофонов. Одно из основных достоинств такой автоматической системы регулирования — быстрота настройки на требуемый режим испытания объекта.

Обычно при таких испытаниях требуется измерять звуковое давление, деформацию и вибрацию. Для этого в комплексе технологического оборудования предусматривается система сбора, измерения и обработки получаемых данных. Эта система должна контролировать среднеквадратичные значения измеряемых величин в ходе эксперимента, регистрировать процессы на магнитной ленте и затем обрабатывать их на анализаторах.

Каналы бегущей волны (рис. 2.69) используются для испытаний элементов обшивки ЛА на акустическую выносливость в ближнем акустическом поле (граница зоны смешивания турбулентной струи) с направлением фронта распространения звуковых волн по касательной к поверхности обшивки.

Установка представляет собой туннельный канал (волновод) 4 с сечением прямоугольной формы. Размеры поперечного сечения канала выбирают в зависимости от габаритных размеров испытываемых панелей, отношение ширины канала к высоте должно быть не менее 1:5. Испытуемую панель 6 устанавливают в рабочую часть блока 5 установки заподлицо с внутренней поверхностью стенки канала.

Корпус волновода 4 установки выполняют железобетонным или полностью металлическим, сварной конструкции. Коэффициент звукопоглощения стен волновода должен быть не выше 1,6%. Звуковые колебания в канале возбуждаются при помощи генераторов-сирен 2,

устанавливаемых в головной части установки. Одно из главных требований воспроизведения бегущих волн — отсутствие отражения звука от стен канала и его торца. Для выполнения этого требования в концевой части канала устанавливают звукопоглощающие клинья 7, которые в некоторых случаях увеличивают длину установки до 10—15 м. Системы электрического и пневматического питания генераторов, управления и измерительная примерно такие же, как и в реверберационных камерах. Уровень акустической мощности до 170 дБ.

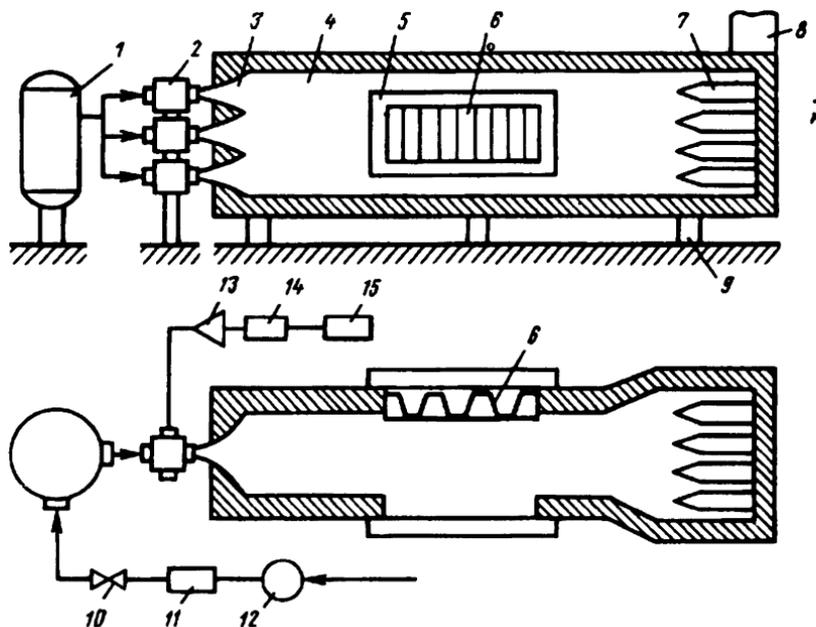


Рис. 2.69. Схема установки бегущей волны:

- 1 - воздушный фильтр; 2 - сирены; 3 - рупоры; 4 - волновод;
 5 - блок установки объекта испытаний; 6 - панель;
 7 - звукопоглощающие клинья; 8 - глушитель; 9 - виброизолирующие;
 10 - задвижки; 11 - дроссель; 12 - ресивер; 13 - усилитель мощности;
 14 - формирующие фильтры; 15 - генератор

Комбинированные установки сочетают преимущества реверберационной камеры и установок с бегущей звуковой волной. Они содержат систему акустических генераторов с рупорами, переходящими в секцию бегущей волны, обычно прямоугольного поперечного сечения, для испытания панелей при достаточно высоких уровнях шума и следующую за ней реверберационную камеру для испытаний на меньших уровнях звукового давления объемных отсеков ЛА.

При необходимости на стенках реверберационной камеры иногда ставят шумопоглощающие клинья, и тогда установка работает в режиме бегущей волны.

К недостаткам комбинированной установки можно отнести неблагоприятное влияние отраженных звуковых волн на характеристики поля в секции бегущих волн при относительно малых размерах оконечной камеры.

Генераторы акустических нагрузок

В качестве генераторов акустических нагрузок могут применяться следующие устройства:

1. Реактивные двигатели, где кинетическая энергия струи воздуха (газа), истекающего из сопла, преобразуется в акустическую энергию.

2. Электродинамические громкоговорители, с помощью которых можно получить практически любой спектр частот.

Принципиальная схема устройства электродинамического громкоговорителя показана на рис. 2.70. В кольцевом воздушном зазоре магнитной цепи, состоящей из постоянного магнита 1 и магнитопровода 2, 3, 4, в радиальном направлении проходит постоянный магнитный поток. В этом зазоре помещается звуковая катушка 5, к которой приложено переменное напряжение звуковой частоты.

Ток, проходя через катушку, взаимодействует с постоянным потоком и создает силу, приводящую в колебание катушку и скрепленную с ней диафрагму (диффузор) 8.

Диффузор, обычно бумажный, представляет собой конус, имеющий в основании окружность или эллипс и прямую или криволинейную образующую. По внешнему краю диффузор имеет гофрированный подвес 7. Назначение подвеса — создать диффузору возможность колебаться поршнеобразно в более широком диапазоне частот и увеличить диапазон линейной зависимости сила — смещение диффузора. У своей вершины диффузор, а вместе с ним звуковая катушка удерживаются в коаксиальном относительно зазора магнитной цепи положении с помощью центрирующей

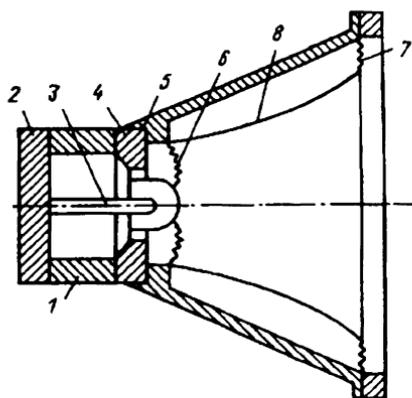


Рис. 2.70. Схема устройства электродинамического громкоговорителя

шайбы 6. Эта шайба, также гофрированная, охватывает по внутреннему контуру вершину диффузора и звуковую катушку, а по внешнему крепится к специальному кольцу.

Такие источники удобны при испытаниях радиоэлектронного оборудования. Основным недостатком такого источника является сравнительно невысокий (порядка 140 дБ) уровень звукового давления.

3. Сирены, в свою очередь, подразделяются на динамические и статические. Работа динамической сирены основана на прерывании вращающимся ротором потока сжатого воздуха, проходящего через отверстия статора.

Динамические сирены могут воспроизводить дискретный спектр частот и широкополосный спектр частот.

Генераторы с дискретным спектром частот. Основным элементом, генерирующим звуковые колебания, является вращающийся диск 2 (рис. 2.71) с отверстиями, установленный в струе воздуха, истекающего из сопел форкамеры 3. Число сопел в форкамере и шаг распределения по окружности соответственно равны числу и шагу распределения аналогичных отверстий в рабочем колесе (диске 2). Попеременное открывание и закрывание отверстий приводит к резкому изменению газодинамических параметров струи и, следовательно, к возникновению пульсаций давления в горле рупора 1, которые возмущают звуковые колебания воздушной среды. Частота звуковых колебаний зависит от частоты вращения ротора; низшая гармоническая составляющая

$$f = \frac{mn}{60},$$

где m — число отверстий форкамеры; n — частота вращения ротора, мин^{-1} ; при этом частоты гармоник $2f, 3f, \dots, kf$.

Число отверстий в диске рабочего колеса и число отверстий в форкамере выбирают в соответствии с требуемым диапазоном частот для испытания. Геометрические размеры форкамеры выбирают такими, чтобы заключенный в ней объем воздуха не со-

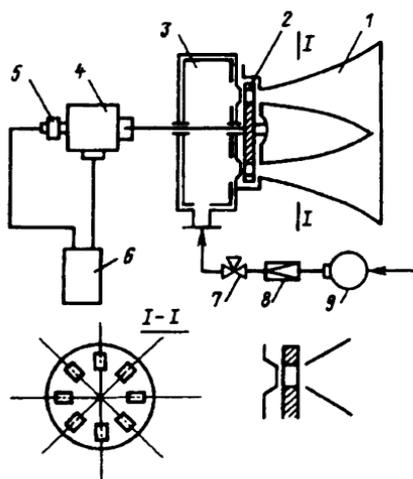


Рис. 2.71. Схема сирены дискретного действия:

- 1 — рупор; 2 — диск; 3 — форкамера;
- 4 — электродвигатель; 5 — датчик обратной связи; 6 — тиристорный привод электродвигателя; 7 — задвижка; 8 — дроссель; 9 — ресивер

здавал резонанса на нижней собственной частоте. Для уменьшения пульсаций давления внутренние поверхности ее облицовывают звукопоглощающим материалом. Рабочий диапазон давления воздуха в форкамере $10^4 - 3 \cdot 10^5$ Па. Повышение давления свыше $3 \cdot 10^5$ нецелесообразно, так как интенсивность звука при этом увеличивается незначительно. Для поддержания заданной частоты в приводе генератора устанавливают датчик обратной связи 5, показания которого подаются на сравнивающее устройство тиристорного привода 6, питающего электродвигатель 4. Точность поддержания частоты должна быть не ниже $1 - 1,5\%$.

Генераторы широкополосного спектра частот. Такие генераторы применяют для воспроизведения случайных процессов акустического нагружения. Они имеют несколько модулирующих дисков. У дисков разное число и размеры проходных отверстий для воздуха. Отверстия по окружности располагают с нерегулярным шагом. Во вращении диски приводятся от отдельных двигателей. Для того чтобы процесс был нециклическим, отношение частот вращения дисков выбирают некратным, при этом мгновенные комбинации положений дисков не повторяются в течение довольно длительного времени.

Генерирование звука в таких сиренах (рис. 2.72) происходит следующим образом. При перепаде давлений между форкамерой 1 и рупором 5 в проточном канале корпуса 7 сирены образуется струя воздуха, поперечное сечение которой вследствие вращения дисков изменяется от нуля (когда отверстия в дисках не совпадают) до некоторой текущей величины, случайно изменяющейся во времени. Так как параметры струи вследствие модуляции ее ротором изменяются с большой скоростью, в горле рупора образуется система газодинамических импульсов давления, которые возбуждают звуковые волны с такой же случайной последовательностью, с какой изменяется площадь проходных отверстий в роторе. Отношение пневматической и акустической мощностей (КПД) в сиренах этого типа примерно $8 - 10\%$.

Рабочий диапазон давлений воздуха перед ротором $5 \cdot 10^4 - 3,5 \cdot 10^5$ Па.

Недостаток сирен такого типа — сложность воспроизведения требуемого спектра шума и автоматического управления им. Этого недостатка лишены генераторы с электродинамическим и электрогидравлическим приводом.

Статические (газоструйные) сирены. Принцип работы статических сирен основан на эффекте, заключающемся в том, что при продувании через коническое сопло потока воздуха со сверхзвуковой скоростью в воздушном потоке перед соплом создается периодическое распределение давления с участками неустойчивости (рис. 2.73). Помещая резонатор в эти участки, получают излучение звуковых волн в окружающее резонатор пространство. Статические сирены создают уровни звукового давления до 180 дБ и выше при широком диапазоне частот.

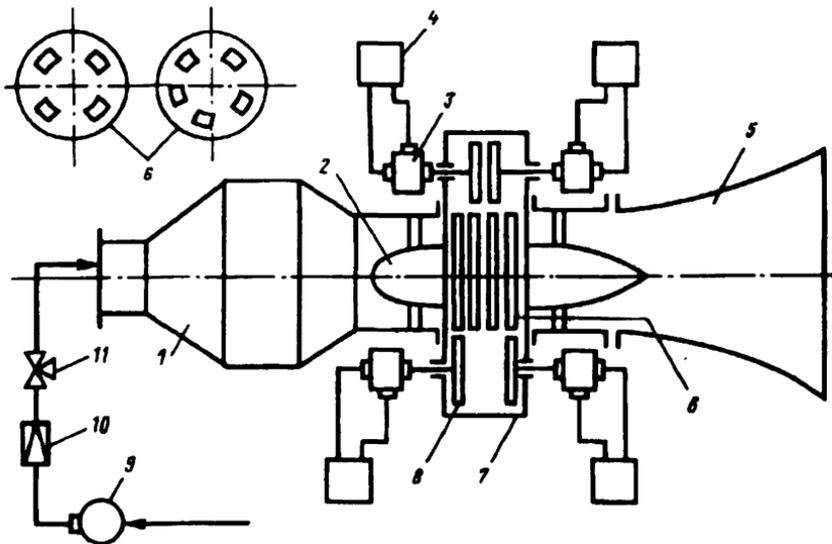


Рис. 2.72. Схема широкополосной сирены:
 1 - форкамера; 2 - обтекатель; 3 - электродвигатель; 4 - тиристорный привод
 двигателя; 5 - рупор; 6 - ротор; 7 - корпус сирены; 8 - шкифы привода;
 9 - ресивер; 10 - дроссель; 11 - задвижка

Электропневматические генераторы. Электропневматические генераторы используются для создания высокоинтенсивных звуковых полей с управляемым широкополосным спектром частот. Такие генераторы подразделяются на высокочастотные и низкочастотные.

Акустическая мощность высокочастотных генераторов не превышает 30 кВт, а диапазон частот регулируемой части спектра 20 — 1200 Гц.

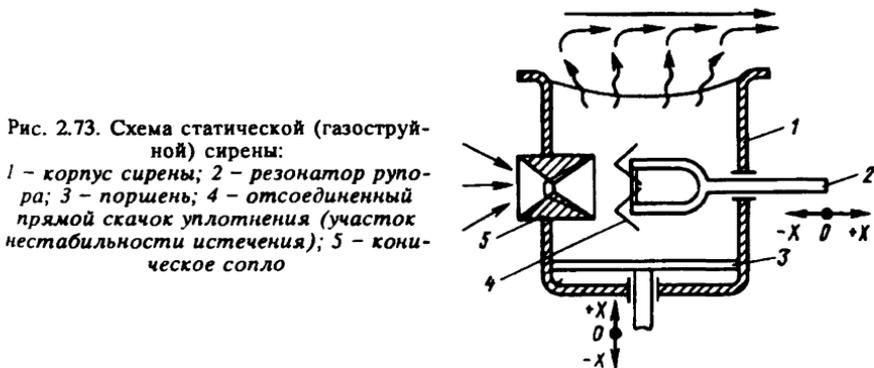


Рис. 2.73. Схема статической (газструйной) сирены:
 1 - корпус сирены; 2 - резонатор рупора; 3 - поршень; 4 - отсоединенный прямой скачок уплотнения (участок неустойчивости истечения); 5 - коническое сопло

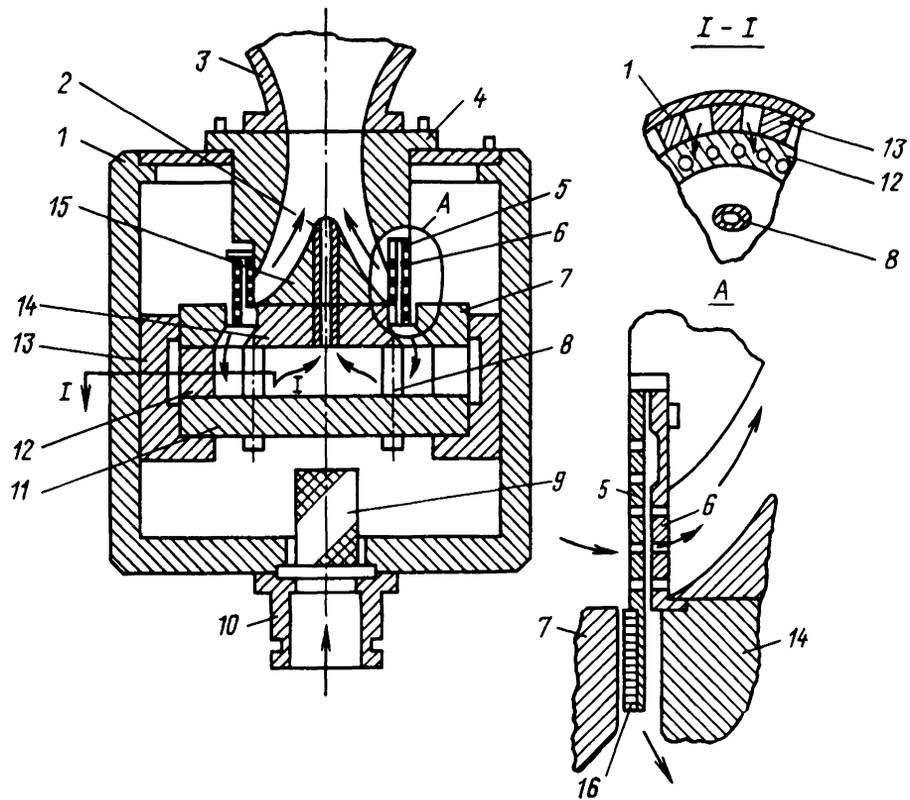


Рис. 2.74. Схема высокочастотного генератора шума

Мощность низкочастотных генераторов достигает 400 кВт в регулируемой части спектра 20 — 500 Гц.

В высокочастотном генераторе (рис. 2.74) основным элементом, создающим звук, является модулирующий клапан, состоящий из двух соосно установленных цилиндров: подвижного 5 и неподвижного 6. В каждом цилиндре имеются концентрически расположенные щели для пропускания воздуха. Верхние концы цилиндров плотно соединены между собой. Неподвижный цилиндр 6 при помощи элемента 15, формирующего проточный канал за модулятором, и трубки 2 закреплен в центральной секции магнита 14.

Отличительная особенность этого генератора — наличие в подвижном цилиндре кольцевой пружины, выполненной в виде нескольких рядов щелей. Промежутки между смежными рядами щелей при осевой нагрузке имеют то же назначение, что и тороидальные кольца или балки. Промежутки между соседними щелями служат как бы стержнями между тороидальными балками. Подобного рода подвеска подвижной системы обеспечивает достаточно высокую соосность сопряженной пары цилиндров и, следовательно, высокую устойчивость к износу. В нижней части подвижного элемента модулятора имеются обмотки катушки возбуждения 16. При взаимодействии протекающего в ней тока с магнитным полем в воздушном зазоре секции 7 и 14 постоянного магнита подвижный цилиндр начинает колебаться, изменяя площадь проходных сечений щелей в неподвижном цилиндре 6. Степень перекрытия этих щелей определяет уровень звукового давления в горловине 4 генератора.

Магнитная система модулятора выполнена в виде замкнутого блока, элементами которого являются секции 7 и 14 магнита, кольцо 12, диск 11 и соединительные стойки 8. Блок магнита закреплен во втулке 13, жестко соединенной с корпусом 1.

Для подвода воздуха к модулирующему устройству на внешней поверхности втулки 13 предусмотрены прорези. Сжатый воздух подводится к генератору через патрубок 10 и фильтр 9. Основная часть его используется в модулирующем клапане, а относительно небольшая часть расходуется на охлаждение катушки возбуждения. Охлаждающий воздух проходит через кольцевую щель магнита и затем через трубку 2 выходит в горловину рупора 3.

Виды акустических испытаний и методы их проведения

Для изучения акустического воздействия на изделие проводят следующие испытания:

— наземные натурные непосредственно на изделии;

- на открытом стенде с работающим двигателем;
- в закрытых боксах с натурным источником шума;
- в акустических камерах.

Наземные натурные испытания позволяют наиболее полно приблизиться к эксплуатационным условиям, а следовательно, обеспечить полную проверку прочности конструкции и функционирования бортового оборудования. Такие испытания являются заключительными в общей программе отработки КЛА на акустические воздействия. Недостатком таких испытаний является их высокая стоимость, так как в течение всех испытаний двигателя, генерирующие акустическое поле, должны работать на максимальной мощности. Полетные условия акустического нагружения в наземных условиях практически не воспроизводятся.

Испытания на открытом стенде с работающим двигателем более экономичны. На таких стендах можно испытывать крупные изделия. Ускорение испытаний и соблюдение требуемых уровней нагрузки в данном случае достигаются выбором положения испытуемых объектов относительно источника шума. Режимы испытаний устанавливаются на основе натуральных изменений звуковых нагрузок и деформаций в контрольных точках поверхности изделия.

Испытания в закрытых боксах позволяют получить более высокие уровни акустических нагрузок, чем на открытом стенде, в результате чего сокращается продолжительность испытаний. Недостатком этих испытаний является некоторое искажение звукового поля по сравнению с натурными условиями.

Испытания в специальных акустических камерах, где создаются условия, близкие к натурным, позволяют получать наиболее достоверную информацию о работоспособности испытуемого объекта. Однако ограниченный объем этих камер не позволяет проводить испытания крупногабаритных объектов.

После внешнего осмотра изделий и измерения параметров, предусмотренных техническими условиями, изделия крепят на специальной оснастке с учетом допускаемых эксплуатационных положений. Нагружаемые изделия нужно испытывать с реальными механическими нагрузками или их эквивалентами.

Испытания проводят с одновременным воздействием на изделие заданного равномерного звукового давления и определенного спектра частот. Важное значение имеет состав акустического спектра мощности источника звукового давления. Продолжительность испытаний определяется требованием программы испытаний и техническими условиями на изделие.

При испытаниях необходимо обнаруживать у изделий резонансные частоты, на которых амплитуда колебаний точек крепления максимальна.

По окончании испытаний производят внешний осмотр и измеряют параметры, указанные в программе испытаний и технических условиях.

2.3.

Испытания на воздействие термических факторов

Широкий диапазон температурных нагрузок (от 150 до 3000°С), действующих на различные элементы КЛА в процессе эксплуатации, влияет как на прочностные характеристики конструкции, так и на процессы функционирования ЛА и его бортовых систем. Особенно сложной является задача проведения экспериментальных исследований при нестационарных температурных полях. Выбор метода нагрева конструкции ЛА при стендовой отработке связан с возможностью воспроизведения максимальных уровней температуры и их перепадов. В связи с этим к нагревательным системам в высокотемпературных установках для испытаний элементов конструкции предъявляют следующие основные требования:

1. Возможность получения высоких (заданных) температур и тепловых потоков с большой (заданной) плотностью.

2. Обеспечение заданного температурного поля на поверхности испытуемого объекта или получение заданного закона распределения плотности теплового потока по нагреваемой поверхности или закона ее изменения по времени полета.

3. Отсутствие побочных эффектов влияния нагревательного устройства на испытуемый объект (например, химического взаимодействия).

4. Отсутствие ограничения для деформаций испытуемой конструкции.

5. Возможность приложения силовых нагрузок к испытуемой конструкции и измерения ее перемещений, деформаций и температур.

6. Возможность наблюдения за поведением конструкции в процессе нагревания.

7. Экономичность процесса нагрева и применение дешевого, простого и надежного в эксплуатации оборудования.

2.3.1.

Основные методы нагрева

При термических испытаниях используются следующие методы нагрева: конвективный, радиационный (лучистый), индук-

ционный, кондуктивный, электронный, пропусканием тока. Возможна также комбинация перечисленных методов.

Конвективный метод нагрева основан на переносе теплоты от жидкости или газа, нагретых до более высокой температуры, к испытуемой конструкции. Конвекция может быть двух видов: свободной и вынужденной.

Свободной (естественной) конвекцией называется движение жидкости, возникающее под действием разности плотностей неравномерно нагретых масс жидкости.

Вынужденной конвекцией называется движение жидкости, возникающее под действием внешней силы (насоса, вентилятора и т.д.). Расчет конвективного теплообмена производится на основе закона Ньютона — Рихмана по формуле

$$Q = \alpha F (T_{ж} - T_{W}) \tau ,$$

где Q — количество теплоты, Дж; α — коэффициент теплообмена, Вт/(м² · К); F — площадь поверхности теплообмена, м²; $T_{ж}$ — среднее значение температуры жидкости (теплоносителя), К; T_{W} — температура омываемой стенки, К; τ — время взаимодействия, с.

Коэффициент теплопередачи α зависит от характера движения жидкости (ламинарный или турбулентный), физических свойств жидкости, скорости движения жидкости, формы сечения объекта испытания, от расстояния до носка или передней кромки, от длины канала, положения омываемой поверхности в пространстве, шероховатости и ряда других факторов.

Значение коэффициента теплопередачи α либо определяется по эмпирическим формулам, получаемым при обработке опытных данных на основе теории подобия, либо получается непосредственно по опытным данным для аналогичных случаев.

Наиболее полное моделирование осуществляется в том случае, когда тепловое воздействие нагревательного устройства стенда эквивалентно аэродинамическому нагреву и когда на испытательном стенде удастся получить конвективный подвод тепла и лучистый отвод такой же, как в полете. В этом случае обшивка КЛА окружается экраном (или кожухом), под которым продувается горячий воздух. При этом применяются два основных способа моделирования аэродинамического нагрева в эквивалентном по тепловому воздействию потоке: первый основывается на применении газодинамических стендов с холодным, а второй — с горячим кожухом.

Источниками нагрева могут быть турбореактивные двигатели, газоплазменные нагреватели, жидкостные реактивные двигатели, электродуговые нагреватели и др.

На рис. 2.75 показана принципиальная схема работающего от ком-

прессора стенда для имитации нагрева обшивки ЛА с применением холодного кожуха. В качестве источника применен газоплазменный нагреватель газа. Необходимо, чтобы при испытаниях на таком стенде температура восстановления $T_{\text{восст}}$ конструкции и коэффициенты теплопередачи α совпадали с температурой восстановления и коэффициентами теплопередачи в полете. ($T_{\text{восст}}$ — это температура пограничного газового потока в непосредственной близости от поверхности тела.)

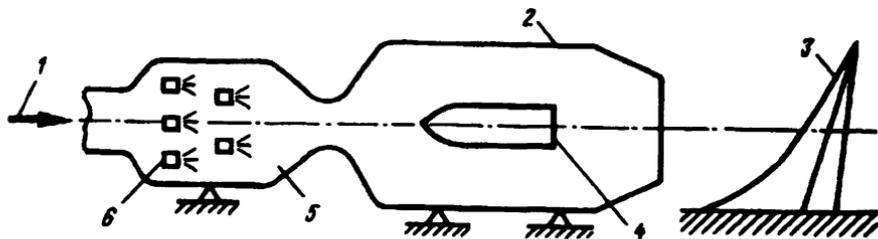


Рис. 2.75. Схема стенда с применением холодного кожуха:
 1 - подвод воздуха от компрессора; 2 - кожух стенда; 3 - отбойная стенка;
 4 - ЛА; 5 - зона нагрева воздуха; 6 - форсунки для подачи горючего

На таком газодинамическом стенде требуется предварительный расчет $T_{\text{пол}}$ и $\alpha_{\text{пол}}$. Такой расчет обычно проводят с достаточной точностью по геометрическим обводам изделия, параметрам траектории полета и приближенной оценке температур поверхностей. Воспроизведение полетных тепловых режимов по этой методике не требует предварительного точного решения задачи нестационарного распространения тепла в конструкции. При таком методе воспроизведения тепловых условий может быть получена точность моделирования аэродинамического нагрева, превышающая точность предварительного расчета температур поверхности. Исходя из соотношений $T_{\text{ст}} = T_{\text{пол}}$, $\alpha_{\text{ст}} = \alpha_{\text{пол}}$ можно найти величину расхода воздуха через стенд, а также контур стендового канала, необходимые для воспроизведения полетных тепловых режимов.

Контролируя при тепловых испытаниях найденные параметры газового потока на стенде, получаем автоматическое обеспечение на поверхности изделия коэффициентов конвективного теплообмена без их предварительного вычисления с автоматическим учетом неизвестной нам заранее температуры поверхности.

Газовый поток на стенде при этом способе моделирования аэродинамического нагрева эквивалентен (в тепловом отношении) сверхзвуковому потоку, омывающему изделие в полете.

Излучаемая от нагретых поверхностей изделия теплота принимается холодным стендовым кожухом (практически температура кожуха $T_{\text{кож}}$ должна быть меньше 400 К). Применение такого метода в основном ограничивается только техническими возможностями подогрева воздуха на стенде до температуры $T_{\text{пол}}$.

Моделирование аэродинамического нагрева ЛА с числом M полета более 6 обычно осуществляется на стендах с горячим кожухом. На таких стендах полетные значения тепловых потоков к поверхности испытуемого изделия без их предварительного расчета автоматически обеспечиваются суммарным воздействием конвективного теплового потока от воздуха, омывающего изделие на стенде, и радиационного потока от горячего стендового кожуха.

Для проведения тепловых испытаний по данной методике необходимо, чтобы

$$\alpha_{\text{ст}} = \alpha_{\text{пол}}; T_{\text{экp}} = T_{W_0}; T_{\text{ст}} \approx T_{W_0}; \epsilon_{\text{экp}} = 1, \text{ где } \alpha_{\text{пол}} = f(M_{\text{пол}}, H_{\text{пол}}, l),$$

где l — расстояние до носка или передней кромки; $\epsilon_{\text{экp}}$ — коэффициент (степень черноты) экрана; T_{W_0} — местная равновесная температура теплоизолированной оболочки в полете с учетом излучения; траектория ЛА выбирается так, чтобы T_{W_0} не превышала 1000 — 1300 К, в то время как $T_{\text{пол}}$ может достигать 3000 — 5000 К; $T_{\text{экp}}$ — местная температура стендового кожуха (экрана); $T_{\text{стенд}}$ — местная температура потока на стенде.

Температура T_{W_0} определяется по формуле

$$\alpha (T_e - T_{W_0}) - \sigma_0 \epsilon \left(\frac{T_{W_0}}{100} \right)^4 = 0;$$

$$T_e = T_H \left(1 + 0,18 M_{\text{пол}}^2 \right).$$

Здесь T_H — температура воздуха на высоте полета.

Основные расчетные формулы для тепловых газодинамических стендов. Температура воздуха на стенде с холодным кожухом

$$T_{\text{ст}} = T_{\text{пол}} = T_H (1 + 0,18 M_{\text{пол}}^2),$$

где $M_{\text{пол}}$ — число Маха на высоте полета; $M = v/a$; v — скорость полета; a — скорость звука на высоте полета.

Расход воздуха в стенде

$$\frac{Mg}{F} = \frac{v p_{\text{пол}}}{R T_{\text{ст}}},$$

где M — массовый расход воздуха, кг/с; F — площадь рассматриваемого сечения стэнда, м²; p — полетное значение давления, Па; V — скорость полета, м/с; R — газовая постоянная (для воздуха) $R = 8,31 \times 10^3$ Дж/(кмоль·К); g — ускорение свободного падения, м/с².

Кожух считается холодным, если $T_{W_0} < 100^\circ\text{C}$.

В последнее время, наряду с широким использованием реактивных двигателей как источников получения мощных газовых потоков с высокими температурами, получили распространение электродуговые нагреватели газа (ЭДНГ).

Электродуговыми нагревателями называют такие установки, которые позволяют получать низкотемпературную плазму, т.е. газ, нагретый до температур $(3 - 50) \cdot 10^3$ К с плотностью тепловых потоков до $4 \cdot 10^5$ кВт/м².

Наиболее распространенным способом получения низкотемпературной плазмы является нагрев газа в термической электрической дуге. Получение высокотемпературных газовых потоков позволяет проводить тепловое моделирование полетов КЛА с гиперзвуковыми скоростями и моделирование условий входа КЛА в атмосферу.

В качестве примера рассмотрим процесс горения дуги в ЭДНГ (рис. 2.76).

Холодный газ 8, обдувая дугу 5, нагревается до высоких температур при теплообмене с разрядным каналом дуги. По мере его нагрева увеличивается электропроводность газа и уменьшается сопротивление между дугой и электродом. Металлический анод 6 из-за малого электрического сопротивления по всей длине имеет одинаковый потенциал, равный потенциалу конца дуги, опирающегося на анод. Разность потенциалов между точкой ϵ конца дуги и любой точкой по длине дуги, например точкой z , может быть записана в виде

$$\Delta U_{\epsilon z} = U_a + \int_0^l E(l) dl . \quad (2.78)$$

Таким образом, между любой точкой дуги (кроме ϵ) и анодом существует разность потенциалов, определяемая уравнением (2.78).

Очевидно, что при определенных условиях может возникнуть такое положение, когда разность потенциалов станет достаточной, чтобы произошел электрический пробой газового промежутка между какой-то точкой дуги, расположенной на оси, и стенкой электрода.

Положительный столб дуги и стенки анода представляют собой как бы два коаксиальных электрода, к которым приложена разность потенциалов, изменяющаяся по длине согласно уравнению (2.78). Промежуток между этими электродами заполнен газом с высокой темпе-

ратурой. С повышением температуры газа электрическое сопротивление промежутка уменьшается. На условия пробоя оказывает влияние и то, что дуга фактически является эмиттером положительных и отрицательных ионов. При повышении температуры, кроме того, начинается процесс термической ионизации. Электрическая прочность газового промежутка будет определяться в основном относительно холодным стеночным слоем газа, который и устанавливает минимальное напряжение пробоя.

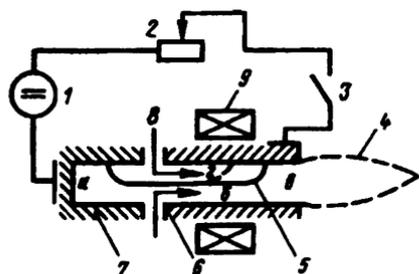


Рис 2.76. Схема электродугового нагревателя:

- 1 - источник постоянного тока; 2 - балластное сопротивление; 3 - включающее устройство; 4 - струя плазмы; 5 - дуга; 6 - анод; 7 - катод; 8 - вход газа; 9 - соленоид

При достижении разности потенциалов, достаточной для пробоя газового промежутка, например между точками б и г (рис. 2.76), развивается новый дуговой канал. Новый канал имеет меньшую длину, а следовательно, и меньшее сопротивление. Канал бв, шунтированный новым разрядным каналом бг, гаснет. Новый конец дуги будет выдвигаться потоком газа к выходу из анода до тех пор, пока не произойдет его шунтирование после очередного пробоя. Так как на стенках электрода существуют шероховатости и дуга расположена не строго по оси, место шунтирования определяется случайно. Поэтому полученные колебания не стабилизированы ни по фазе, ни по амплитуде.

Обычно необходимые параметры горения дуги (ток I и напряжение U_d) получают введением в цепь дуги балластного сопротивления (см. рис. 2.81, поз. 2):

$$R = \frac{U - U_d}{I},$$

где U — напряжение источника питания I .

При этом балластное сопротивление должно быть выбрано таким, чтобы соблюдалось условие устойчивости положения равновесия.

Одной из важнейших характеристик дуг, горящих в ЭДНГ, является вольт-амперная характеристика. Она определяет область устойчивых режимов работы и электрические параметры ЭДНГ. Вольт-ампер-

ными характеристиками называют семейство кривых, которые показывают зависимость напряжения на дуге от силы тока. Так как напряжение дуги складывается из катодного и анодного падения потенциалов и падения потенциалов в столбе дуги, эти характеристики объясняют не электрические свойства дуги, а свойства ЭДНГ в целом. Вольт-амперные характеристики в основном определяются сопротивлением электрической дуги. Сопротивление дуги — функция многих переменных, изменяющаяся с ростом температуры нелинейно, поэтому и вольт-амперные характеристики являются нелинейными.

На горение дуги в ЭДНГ влияет ряд факторов, определяющих пространственно-временное распределение источников тепла в дуге и условия рассеяния энергии в окружающую среду (унос тепла газом). Суммарный эффект влияния всех факторов сказывается на вольт-амперной характеристике дуги. Вольт-амперная характеристика зависит от расхода рабочего газа, его давления и способа подвода, геометрических размеров, формы и расположения электродов, материала электродов, полярности, собственного электромагнитного поля и других факторов.

Для ЭДНГ тепловой КПД представляет собой отношение теплового потока к мощности дуги:

$$\eta = \frac{G\Delta h}{UI},$$

где G — расход газа, кг/с; Δh — удельная энтальпия, Дж/кг; U — напряжение, В; I — сила тока, А.

Тепловой КПД зависит от следующих факторов:

- а) конвективного теплообмена между нагреваемым газом и поверхностями электродов;
- б) потерь тепла в опорных пятнах дуги;
- в) потерь, определяемых излучением дуги и газа.

Потери тепла, описанные в п. «б» и «в», пренебрежимо малы. Таким образом, тепловой КПД высоковольтного плазмотрона ЭДНГ определяется главным образом теплопереносом.

К основным недостаткам ЭДНГ относятся:

- эрозия электродов, загрязняющая газовый поток;
- малый размер диаметра струй газа;
- наличие в струе пульсации температуры, плотности, скорости и других параметров и неоднородное их распределение по сечению струи.

Принцип действия газоплазменных нагревателей заключается в сжигании горючих газов в смеси с воздухом или кислородом.

Достаточно хорошие характеристики получаются при сжигании смеси ацетилена с кислородом: плотность теплового потока может

превышать 2000 кВт/м^2 , температура пламени достигает значений 3800 К . Для нагрева больших поверхностей отдельные горелки объединяют в блоки.

Но газоплазменные нагреватели не получили широкого распространения при тепловых испытаниях на прочность из-за следующих недостатков:

- потребности в больших количествах газа;
- потребности в мощных вытяжных вентиляционных системах;
- взрывоопасности;
- сложности регулирования температуры нагрева;
- несоответствия химического состава нагретого газа условиям эксплуатации ЛА.

Радиационный метод нагрева характеризуется тем, что испытываемая конструкция нагревается за счет превращения в теплоту электромагнитных колебаний излучения нагревателя. При этом окружающая среда непосредственно не участвует в переносе тепла и нагревается до невысоких температур.

Такой метод нагрева позволяет получить достаточно однородное поле температуры на испытываемой конструкции. Благодаря универсальности и сравнительной простоте установок этот метод получил наибольшее распространение при проведении таких видов испытаний ЛА, как теплостатические и тепловакуумные.

Теплопередача излучением рассчитывается с помощью законов Стефана — Больцмана и Ламберта.

Закон Стефана — Больцмана позволяет определить плотность теплового потока, излучаемого телом, имеющим относительный коэффициент лучеиспускания (степень черноты) ϵ и нагретого до температуры T_W :

$$q = \epsilon \sigma T_W^4 ,$$

где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Закон Ламберта определяет тепловой поток излучения в определенном направлении:

$$dQ_\phi = \left(\frac{\epsilon \sigma}{\pi} \right) T_W^4 \cdot \cos \phi \cdot d\Omega dF ,$$

где ϕ — угол между нормалью к излучающей площадке dF и направлением распространения излучения; $d\Omega$ — элементарный угол с вершиной в центре площадки dF .

Так как излучение передается электромагнитными колебаниями, то в соответствии с законом Голицына — Вина длина волны, на которой имеет место максимум излучения, определяется соотношением

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \text{ мкм.}$$

Из этого соотношения следует, что для температур от 1000 до 3500 К, представляющих интерес для теплостатических испытаний, энергия излучения переносится в основном электромагнитными колебаниями с длиной волны $\lambda > 0,76$ мкм, что соответствует инфракрасной области спектра.

Инфракрасные нагреватели обладают рядом положительных свойств, которые и определяют их широкое распространение при тепловых испытаниях:

- создают лучистые потоки с большой поверхностной плотностью;
- позволяют осуществлять управление потоком по времени при сложных программах нагрева;
- позволяют получить потребное распределение плотности теплового потока по поверхности испытуемой конструкции;
- позволяют непосредственно измерить тепловую энергию, подаваемую на конструкцию;
- делают возможным наблюдение за поведением конструкции в процессе эксперимента, так как устанавливаются на некотором расстоянии от поверхности испытуемой конструкции;
- могут применяться для нагрева поверхностей различной формы, выполненных из различных материалов, причем площадь нагреваемой поверхности ограничивается только располагаемой электрической мощностью.

Сочетание радиационного нагрева с охлаждением излучателей и рефлектора струями холодного воздуха (или азота) или жидкими охладителями (вода, эмульсии) позволяет получить повышенные температуры и увеличить время нагрева, а также обеспечить более быстрые темпы изменения температуры при нагреве или охлаждении поверхности конструкции.

В качестве недостатков метода радиационного нагрева следует указать:

- невозможность создания граничных условий, близких к граничным условиям при полете ЛА в плотных слоях атмосферы с тем, чтобы внутренний нагрев конструкции моделировался автоматически;
- трудность контроля температур.

На рис. 2.77 показана элементарная принципиальная схема инфракрасного нагревателя, состоящего из рефлектора 1 и излучателей 2, которые могут быть расположены в один, два или три ряда.

Излучатели для инфракрасного нагревателя могут быть выполнены трубчатыми или ленточными.

На рис. 2.78 показана схема крепления трубчатого излучателя при создании инфракрасного нагревателя.

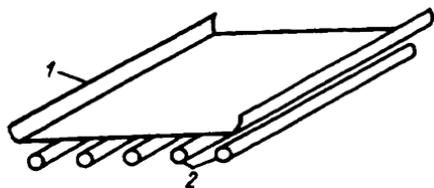


Рис. 2.77. Схема инфракрасного нагревателя:
1 - рефлектор; 2 - излучатели

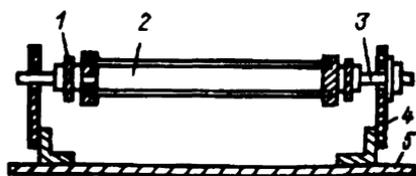


Рис. 2.78. Схема крепления трубчатых излучателей к каркасу:
1 - шайба; 2 - излучатель; 3 - шпилька;
4 - державка; 5 - каркас

Общие рекомендации, которыми надо руководствоваться при создании таких нагревателей, сводятся к следующему:

1. Нагреватель должен быть легким, если его необходимо крепить к конструкции, и не должен изменять прочность и жесткость испытуемой конструкции.

2. Нужно учитывать деформацию конструкции при тепловом испытании.

3. Один конец излучателя нужно закреплять, а другой должен иметь свободу перемещения.

4. При изготовлении трубчатого излучателя нужно, чтобы ширина сварного шва была минимальной. Шов не должен располагаться на стороне, обращенной к поверхности конструкции, так как шов нагревается больше, чем весь излучатель, и это обуславливает дополнительную неравномерность теплового потока.

5. Сварка должна быть качественной, особенно сварка шайб, поскольку из-за малой площади контакта возникает местный прогар конструкции.

Наряду с трубчатыми излучателями применяются ленточные. Увеличение поверхности излучения способствует снижению степени неравномерности теплового потока, а уменьшение теплоемкости лент снижает инерционность.

Недостатком ленточного нагревателя является малая жесткость на изгиб, поэтому длина ленточных излучателей должна быть небольшой.

Для получения лучистых потоков высокой интенсивности нагреватель должен иметь рефлектор, который одновременно уменьшает степень неравномерности плотности теплового потока.

В случае применения неохлаждаемого рефлектора (рис. 2.79,а) его обратная сторона должна иметь высокую степень черноты для повышения интенсивности охлаждения за счет излучения. Обычно такие рефлекторы изготавливают из материала Д16, а на обратную сторону рефлектора наносят термостойкие покрытия с высокой степенью черно-

ты. Такие рефлекторы используются при нагреве конструкции до 1100 К, температура же самого рефлектора достигает значений 725 К.

Если плотность теплового потока составляет от 200 до 300 кВт/м², можно использовать рефлекторы, охлаждаемые потоком сжатого воздуха (рис. 2.79,б). Если плотность теплового потока более 300 кВт/м², применяются рефлекторы, охлаждаемые водой (рис. 2.79,в).

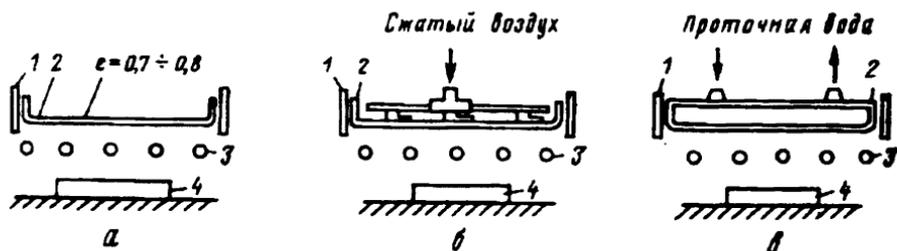


Рис 2.79. Типы рефлекторов:

а – рефлектор без принудительного охлаждения; *б* – рефлектор с воздушным охлаждением; *в* – рефлектор с водяным охлаждением:
 1 – корпус нагревателя; 2 – рефлектор; 3 – излучатели; 4 – нагреваемый объект

Для инфракрасных нагревателей используют трубчатые и ленточные излучатели из таких материалов, как хромоникелевые сплавы, нихромы Х20Н80 и Х20Н80-ТЗ, хромоалюминиевые сплавы типа ОХ23105А (ЭН595) и ОХ27105А (ЭИ626) и сплав на никелевой основе ХН60В (ЭИ868). Эти сплавы имеют хорошие технологические свойства, легко поддаются механической обработке, хорошо свариваются, легко гнутся. Номинальные температуры таких излучателей порядка 1200 К, а при максимальном режиме они могут достигать значений 1375 К.

Излучатели из силитовых материалов, выполненных в виде стержней, позволяют нагревать конструкцию до температур 1000 — 1600 К. При температурах 1800 К начинается разложение карбида кремния и разрушение поверхности нагревателя. Такие излучатели в основном служат 2000 ч при температуре 1675 К. При кратковременных испытаниях ($\tau = 10$ мин) допускается температура до 1850 К. Эти излучатели могут выдерживать без разрушения темп нагревания до 300 К/с и темп охлаждения при обдувании воздухом до 60 К/с. Силитовые стержни обладают большой тепловой инерцией.

Наиболее широко в качестве излучателей для инфракрасных нагревателей применяются кварцевые лампы (рис. 2.80), в которых излучающим элементом является вольфрамовая спираль, уложенная в герметическую оболочку из кварцевого стекла, заполненную парами йода и аргона.

Максимум излучения при температурах от 2600 до 3200 К лежит в инфракрасной области спектра. Мощность кварцевых ламп от 1000 до 5000 Вт, длина от 250 до 1000 мм, срок годности — до 5000 ч, питание от сети 127, 220 и 380 В. Время нагрева ламп не более 0,6 с. Лампы могут работать в вакууме. Прочность таких ламп выше, чем стеклянных, температурный коэффициент линейного расширения мал, поэтому даже при попадании брызг воды они не растрескиваются, хорошо переносят циклическую нагрузку.

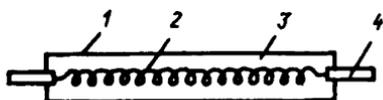


Рис. 2.80. Схема кварцевой лампы:
1 - кварцевая колба; 2 - вольфрамовая спираль; 3 - пары аргонно-йодовой смеси; 4 - молибденовые выводы

Возможности инфракрасного нагревателя в получении высоких температур ограничиваются свойствами кварцевой оболочки лампы. При температуре 1450 К, близкой к началу размягчения кварца, теряется прозрачность колбы, происходит резкий скачок температуры кварца, давление внутри колбы повышается и лампа разрушается. Поэтому получение температур выше 1450 К на испытуемой поверхности возможно лишь в течение коротких промежутков времени.

Большое влияние на работоспособность и срок службы нагревателя оказывает состояние поверхности колбы. Загрязнения поверхности, такие, как запыление, осаждение продуктов сгорания, жировые пятна и др., являются причиной местного перегрева отдельных участков колбы, сопровождающегося разрушением лампы.

В случае многорядного распределения ламп может быть применено принудительное охлаждение колб потоками воздуха. Охлаждение поверхности конструкции при этом несущественно, так как конвективный поток пренебрежимо мал по сравнению с лучистым потоком от нагревателя.

Охлаждение колб увеличивает ресурс лампы, а также позволяет производить нагревание конструкции при температурах до 1600 К в течение длительного времени.

Нагреватели с угольными и графитовыми излучателями обладают высокой механической прочностью, сохраняющейся при повышенных температурах, низким модулем упругости, высокой теплопроводностью, низким коэффициентом линейного расширения, высокой излучательной способностью, легко поддаются механической обработке, стоят дешево. Применяются при изготовлении нагревательных элементов для печей сопротивления, работающих в вакууме или защитной среде при температуре 3200 К.

Графитовые материалы отличаются от угольных тем, что они имеют большую теплопроводность, меньшее электросопротивление, содержат меньшее количество золы, легче поддаются механической обработке. Прочность графита ниже, чем у угля, а химическая стойкость у них примерно одинакова. Высокая теплопроводность и малый коэффициент линейного расширения делают графит малочувствительным к перепадам температур, что позволяет ему выдерживать многократно без разрушений высокие темпы нагрева и охлаждения.

Углеродистые излучатели могут применяться в воздушной и инертных средах, в азоте и в вакууме.

При нагревании на воздухе окисление графита начинается при температуре 670—720 К. Образующиеся при этом легколетучие окислы CO и CO₂ удаляются с поверхности, не препятствуя ее дальнейшему окислению. С повышением температуры и скорости протекания газа над нагретой поверхностью скорость окисления графита увеличивается.

Срок службы графитовых нагревателей определяется в основном условиями окисления и испарения излучателей. При нагревании на воздухе до 2500 К время работы нагревателя исчисляется несколькими минутами. При нагревании в вакууме 10^{-1} Па и температуре 2600 К продолжительность работы излучателя из графита составляет несколько десятков часов, а при температуре 2700 — 2800 К — несколько часов.

В качестве недостатков инфракрасных излучателей с графитовыми излучателями следует отметить:

- большую тепловую инерцию, обусловленную высокой плотностью материала и относительно большими диаметрами и толщинами излучательных элементов;

- необходимость создания большой силы тока из-за малого электрического сопротивления, что делает громоздкими системы энергоснабжения и управления нагревом;

- необходимость охлаждения электропроводящих шин;

- науглероживание в случае длительного нагрева графитовыми излучателями конструкции из вольфрама, тантала, молибдена, ниобия и т.д. при температурах выше температуры рекристаллизации как в вакууме за счет испарения графита, так и в среде технического аргона за счет образующейся окиси углерода. Науглероживание приводит к некоторому снижению прочности и повышению пластичности указанных материалов.

Инфракрасные нагреватели с излучателями из тугоплавких материалов изготавливаются из вольфрама и молибдена, температура плавления которых соответственно $T_{\text{вол}} = 3653$ К; $T_{\text{мол}} = 2883$ К. Основные преимущества таких излучателей перед силитовыми и графитовыми — их малая инерционность. С помощью этих излучателей возможно создание скоростей нагрева до нескольких сот градусов в се-

кунду. Рабочая температура излучателей из молибдена может достигать 2200 К, а из вольфрама — 3300 К.

Характерной особенностью вольфрама и молибдена является их высокая окисляемость на воздухе. Окисление на воздухе начинается при температуре 673 К и быстро растет при ее увеличении. В связи с этим нагревательные устройства из вольфрама и молибдена могут использоваться только в вакууме или в защитных средах (в аргоне, гелии, азоте и т.д.). При работе в вакууме срок службы излучателей зависит в основном от скорости испарения.

Технологический процесс изготовления излучателей весьма сложен, так как тугоплавкие металлы трудно поддаются механической обработке, плохо свариваются, химически взаимодействуют с крепежными деталями из керамики и т.д. Сварка молибдена может быть осуществлена только в среде инертного газа, а сварка вольфрама обычным методом пока неосуществима.

Методика и техника статических испытаний с использованием нагревательных устройств с излучателями из тугоплавких металлов пока только разрабатываются.

В последнее время в качестве источника инфракрасного излучения используются квантовые генераторы инфракрасного излучения — иразеры (лазеры в инфракрасной области спектра).

Работа иразеров основана на принципе вынужденной эмиссии инфракрасного излучения квантовых систем, в которых создана инверсия населенностей энергетических уровней. Иразер, работающий как генератор, является источником инфракрасного излучения. Иразеры обладают высокой когерентностью излучения, высокой монохроматичностью излучения, малой шириной пучка излучения.

Максимальная мощность излучения в импульсе иразера, который длится несколько наносекунд, достигает 10^{10} Вт; спектральная плотность потока излучения достигает значений, соответствующих излучению абсолютно черного тела при температурах 10^{10} — 10^{30} К; сфокусированный пучок излучения иразера позволяет создать энергетическую освещенность до 10^{18} — 10^{19} Вт/м².

Иразеры излучают в ближней, средней и дальней инфракрасной области.

Составными частями иразера являются активное вещество и источник энергии для накачки активного вещества.

Иразеры бывают на твердом теле, газовые и полупроводниковые.

Иразеры на твердом теле (в качестве активного вещества используется твердое тело) можно разделить на импульсные и работающие в непрерывном режиме.

Длительность импульса импульсных иразеров может составлять от нескольких миллисекунд до долей наносекунд, выходная энергия импульса излучения — от долей джоуля до сотен и тысяч джоулей. Со-

кращая продолжительность импульса, можно получить в течение нескольких наносекунд мощность порядка гигаватта. Угол расхождения пучка импульсных ирразеров составляет от нескольких секунд до нескольких десятков угловых минут, степень монохроматичности излучения — около 10^{-6} .

Мощность, создаваемая непрерывным ирразерным пучком, доходит до 100 Вт.

Параметрами газовых ирразеров являются мощность и угол расхождения пучка излучения, длина волны и степень монохроматичности излучения. В основном газовые ирразеры имеют мощность непрерывного пучка порядка нескольких милливольт. Основным достоинством газовых ирразеров является малая ширина спектральной линии генерируемого излучения, поэтому газовый ирразер — практически монохроматический источник излучения. Достигнуты очень малые значения угла расхождения ирразерного пучка — порядка долей угловой минуты.

Газовые ирразеры, работающие в импульсном режиме, уступают ирразерам на твердом теле по мощности импульса излучения (около 100 Вт в импульсе ирразера, работающего на смеси He-Ne), но значительно превосходят их по частоте повторения импульсов, достигая значений 10^3 Гц при микросекундных импульсах.

Длины волн излучения, генерируемого газовыми ирразерами, занимают широкую область спектра — от ультрафиолетовой до далекой инфракрасной ($\lambda = 538$ мкм). При дополнительной концентрации пучка излучения системой линз можно облучить площадь 10^{-8} м² при непрерывной энергетической освещенности 10^{11} Вт/м².

Полупроводниковый ирразер может работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме. При непрерывном режиме достигнуты мощности ирразерного излучения порядка 1 Вт. В пересчете на единицу объема активного вещества эта мощность почти в 10^5 раз больше, чем в лучших ирразерах других типов. При импульсной работе мощность проблесков излучения достигает 100 Вт при частоте повторения 1 — 10 кГц (при температуре 77 К). КПД полупроводниковых ирразеров очень высок, он составляет 20 — 40%, а при низкой температуре и интенсивной накачке доходит до 60%.

Ирразеры используются для создания высоких температур — порядка нескольких тысяч кельвинов.

В настоящее время существуют следующие способы построения нагревателей из стандартных излучательных элементов: интегральный, модульный и индивидуальный.

Интегральный способ характеризуется тем, что излучатели собираются на единой опорной конструкции с общим рефлектором. Нагреватель в этом случае проектируется под конкретный тип конструкции и в какой-то степени повторяет ее обводы (рис. 2.81,а).

Преимуществом такого способа является возможность добиться

требуемого значения и распределения плотности теплового потока и заранее предусмотреть приложение нагрузки к конструкции. Такие нагреватели имеют более высокий КПД.

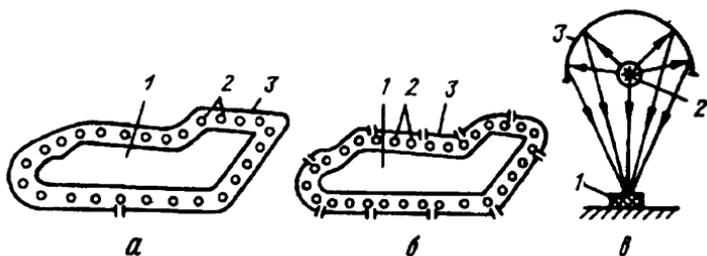


Рис. 2.81. Способы построения инфракрасных нагревателей:
а — интегральный; б — модульный в — индивидуальный:
1 — испытуемый объект; 2 — излучатели; 3 — рефлектор

Недостаток данного способа — ограниченные возможности использования нагревателя при высокой стоимости его изготовления.

Интегральный способ в основном применяется только в серийных испытаниях.

Модульный способ объединяет небольшое количество равномерно расположенных излучателей. Изготавливают несколько типоразмеров стандартных нагревателей, из которых в дальнейшем собираются панели нагревателей различных конструкций (рис. 2.81, б).

Преимуществом данного способа является универсальность нагревателей, возможность многократного их использования при испытаниях различных конструкций и, как следствие, их экономическая выгода.

Недостаток данного способа — искажение поля теплового потока в местах стыка отдельных блоков, где образуются неизлучающие зоны и усиливается естественная конвекция из-за притока воздуха через зазоры между блоками.

Модульный вариант построения нагревателя целесообразно применять на временных стендах.

Индивидуальный способ заключается в создании нагревателей из одного излучателя с рефлектором, из которых в дальнейшем собираются нагревательные панели (рис. 2.81, в).

Преимущества данного способа: возможность учета особенностей нагревания путем неравномерной установки нагревателей; индивидуальность управления каждым нагревателем; создание для нагревателя рефлектора требуемой геометрии, что позволяет получать повышенную плотность потока за счет фокусировки лучистой энергии.

Такой способ рекомендуется при испытаниях небольших изделий или отдельных участков, где требуется повышенная точность воспроизведения температурных полей.

Одной из основных характеристик инфракрасного нагревателя является плотность лучистого потока Q ($\text{кВт}/\text{м}^2$) и зависимость ее от подводимой электрической мощности: $q = f(W)$

Второй важной характеристикой является степень неравномерности плотностей лучистых потоков k .

На k влияют форма и состояние (степень черноты и температура) рефлектора и облучаемой поверхности, высота расположения нагревателя (расстояние от оси излучателя до нагреваемой поверхности), расстояние между излучателями.

При автоматическом управлении плотностью лучистого потока необходимо знать инерционные характеристики излучателя.

Инерционность инфракрасных излучателей в основном определяется теплоемкостью излучателей, рабочей температурой и степенью черноты поверхности излучателя, а также конвективным теплообменом с окружающей средой, теплоемкостью рефлекторов и токопроводящей арматуры (контактов).

Существует параметр χ/φ , характеризующий инерционность нагревателя (рис. 2.82). Этот параметр χ/φ зависит от постоянной времени χ и характеристики излучателя

$$\varphi = \frac{c\bar{\delta}\rho}{\epsilon}$$

где c — удельная теплоемкость материала излучателя при температуре T , $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; ϵ — степень черноты поверхности излучателя при температуре T ; $\bar{\delta}$ — определяющий размер излучателя, м; $\bar{\delta} = V/S$; V — объем материала излучателя, м^3 ; S — площадь излучающей поверхности материала, м^2 ; ρ — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Под постоянной времени χ понимается время увеличения температуры от текущей температуры T_0 на величину

$$T = 0,63(T_y - T_0)$$

при мгновенном увеличении подаваемой на излучатель мощности (рис. 2.83).

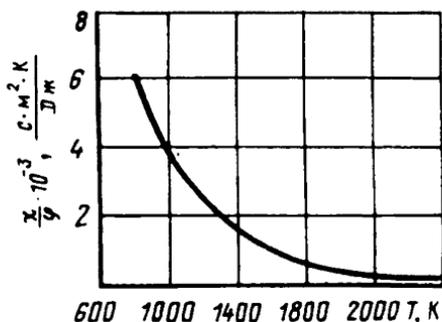


Рис. 2.82. Определение инерционности инфракрасного нагревателя

Зная характеристику излучателя ϕ , нетрудно найти по графику постоянную времени χ (в секундах). В табл. 2.5 приведены расчетные значения постоянной времени для различных типов инфракрасных нагревателей.

Установившаяся температура T_y одиночного излучателя при заданном значении подаваемой мощности может быть определена по формуле

$$T_y = 65 \sqrt[4]{\frac{\mu W}{\varepsilon}},$$

где μ — обобщенный параметр, характеризующий потери теплоты за счет конвекции и теплопроводности; при испытаниях в спокойной среде он равен $\sim 0,9$.

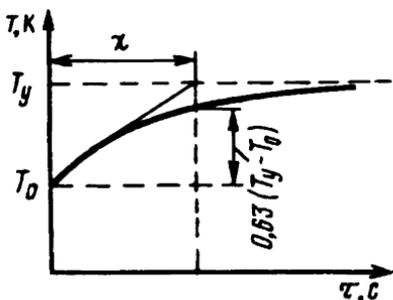


Рис. 2.83. Определение постоянной времени инфракрасного нагревателя

Важной характеристикой инфракрасного нагревателя является срок службы излучательных элементов. Известно, что при нагревании на воздухе материалы окисляются. Температура окисления зависит от химического состава материала излучателя и изменяется в широких пределах.

Тугоплавкие материалы — молибден и вольфрам — начинают окисляться при температуре 570 — 600 К, графит — при температуре 670 — 720 К, хромоникелевые сплавы (нихромы)

и хромалюминиевые сплавы — при температуре, близкой к температуре плавления, т.е. при 1300 — 1500 К.

С увеличением температуры излучателя и скорости движения воздуха интенсивность окисления возрастает. У излучателей из графита срок службы при высоких температурах исчисляется минутами, а у нагревателей с нихромовыми излучателями при рабочих температурах — сотнями часов.

При работе в вакууме материалы излучательных элементов начинают испаряться. Отметим, что при температуре 1750 К металлы и сплавы на основе никеля, железа и хрома применять в вакуумных камерах нельзя из-за интенсивного испарения.

Для предотвращения окисления излучателей давления в вакуумных камерах не должно превышать $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па при температуре выше 720 К.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАКРАСНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

Тип инфракрасного нагревателя	Рабочая температура излучателя T , К	Максимальная плотность лучистого потока q , кВт/м ²	Максимальная температура поверхности нагреваемой конструкции T , К	Постоянная времени χ , с
Нагреватель с трубчатыми излучателями из сплава ЭИ 868 (диаметр 25 мм, толщина фольги 0,2 мм)	1350	120	1100	2
Нагреватель с силитовыми излучателями (диаметр 14 мм)	1850	350	1500	7
Нагреватель с кварцевыми лампами (диаметр спирали 0,13 мм, диаметр нити 0,25 мм)	3000	600	1400	0,4
Нагреватель с охлаждаемыми колбами кварцевых ламп и рефлекторами	3000	1500	1800	—
Нагреватель с ленточными излучателями из молибдена (ширина ленты 30 мм, толщина 0,2 мм)	2273	—	—	4
Нагреватели с трубчатыми излучателями из графита (диаметр 18 мм, толщина трубки 3,5 мм)	3000	—	—	2

Срок службы излучателей может быть продлен в результате увеличения толщины или диаметра излучателей или нагревания их в защитных средах.

Для определения облика инфракрасного нагревателя приходится проводить тепловые расчеты лучистого теплообмена в системах тел произвольной формы.

Обычно при таких тепловых расчетах решаются две задачи:

1. Полагая, что плотность теплового потока от излучателей задана и электрическая мощность используемых установок не ограничивает возможность эксперимента, находят или плотности тепловых потоков, падающих на конструкцию и на рефлектор, или плотности тепловых потоков, аккумулируемых конструкцией и рефлектором в условиях стационарного лучистого теплообмена.

2. Определяют время, за которое создаваемый инфракрасный нагреватель может нагреть испытываемую конструкцию до заданной температуры, т.е. рассчитывают кривую нагрева.

Методика расчета инфракрасного нагревателя, работающего в условиях стационарного теплообмена, предусматривает следующие допущения:

— все тела предполагаются серыми и подчиняются закону Ламберта; температуры, излучательные и пропускательные способности одинаковы во всех точках поверхности каждого из тел;

— излучающие тела неподвижны, и другие виды переноса тепла, кроме лучистого, отсутствуют;

— среда, в которой находятся тела, не поглощает лучистую энергию;

— рефлекторы изготовлены из материала с низкой степенью черноты, энергией собственного излучения которых можно пренебречь по сравнению с энергией излучателей и нагреваемого изделия;

— излучатели изготавливаются из материала, обладающего высокой поглощательной или пропускательной способностью, и поэтому их отражательную способность можно принять равной нулю; принимается, что плотность теплового потока, падающего на поверхность объекта, одинакова во всех точках этой поверхности.

Рассматривается лучистый теплообмен в замкнутой системе тел: нагреваемая конструкция, рефлектор и излучатели. Основные геометрические характеристики цилиндрического нагревателя с рефлектором показаны на рис. 2.84. Расчет сводится к определению таких геометрических параметров, как r , R_n , R_p и числа излучателей N по заданным:

— плотности падающего на конструкцию лучистого потока $q_{к.пад}$;

— радиусу нагреваемой конструкции R_k ;

— отражательными способностями конструкции C_k и рефлектора C_p ;

— степени черноты $\epsilon_{\text{и}}$ и температуре излучателей $T_{\text{и}}$ или их удельной мощности $w_{\text{и}}$.

Плотность теплового потока $q_{\text{к.пад}}$ находят как частное от деления заданной программой испытаний максимальной плотности поглощаемого потока $q_{\text{пг.мах}}$ на поглощательную способность конструкции $A_{\text{к}}$.

При проектировании нагревателя используются следующие формулы для нахождения плотностей лучистых потоков: падающего на конструкцию $q_{\text{к.пад}}$, аккумулируемого конструкцией $q_{\text{к.ак}}$, аккумулируемого рефлектором $q_{\text{р.ак}}$:

$$q_{\text{к.пад}} = \frac{1}{\Delta} \left(q_{\text{и}} \frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{к}}} \gamma + C_{\text{р}} \Phi_{\text{к.р}} \Phi_{\text{р.к}} \sigma_0 \epsilon_{\text{к}} T_{\text{к}}^4 \right); \quad (2.79)$$

$$q_{\text{к.ак}} = \frac{1}{\Delta} \left[q_{\text{и}} \frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{к}}} \gamma (1 - C_{\text{к}}) - \Delta_1 \sigma_0 \epsilon_{\text{к}} T_{\text{к}}^4 \right]; \quad (2.80)$$

$$q_{\text{р.ак}} = \frac{1}{\Delta} \left[q_{\text{и}} \frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{р}}} (\Phi_{\text{и.р}} + C_{\text{к}} \Phi_{\text{и.к}} \Phi_{\text{и.р}}) + \Phi_{\text{и.р}} \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{р}}} \sigma_0 \epsilon_{\text{к}} T_{\text{к}}^4 \right] (1 - C_{\text{р}}), \quad (2.81)$$

где $C_{\text{к}}$; $C_{\text{р}}$ — отражательная способность конструкции и рефлектора; Φ — коэффициент облученности; индексы «к», «р» и «и» указывают, что величина относится к конструкции, рефлектору и излучателю. Например, $\Phi_{\text{к.р}}$ — коэффициент облученности рефлектора от конструкции; $q_{\text{и}}$ — удельная мощность излучателя.

Для определения $q_{\text{к.пад}}$; $q_{\text{к.а}}$; $q_{\text{р.а}}$ необходимо знать удельную мощность излучателей.

Для непрозрачных трубчатых излучателей, таких, как нихромовые трубки, силитовые, графитовые или вольфрамовые стержни,

$$q_{\text{и}} = \frac{2\pi r}{S} \sigma_0 \epsilon_{\text{и}} T_{\text{и}}^4, \quad (2.82)$$

где r — радиус; S — шаг излучателей $S = 2\pi R_{\text{и}}/N$. Следовательно,

$$q_{\text{и}} = \frac{rN}{R_{\text{и}}} \sigma_0 \epsilon_{\text{и}} T_{\text{и}}^4. \quad (2.83)$$

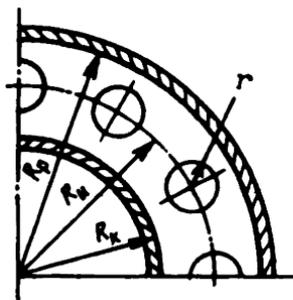


Рис. 2.84. Основные геометрические характеристики цилиндрического нагревателя

Для кварцевых ламп q_n удобно определять по электрической мощности:

$$q_n = \frac{W_n \eta}{S}, \quad (2.84)$$

где W_n — мощность излучателя (берется из справочника); η — коэффициент полезного действия излучателя, $\eta = 0,95$.

Затем находят коэффициенты облученности. Коэффициенты облученности — это геометрические характеристики системы тел, находящихся в лучистом теплообмене друг с другом. В нашем случае они являются функциями пяти переменных: r, R_k, R_n, R_p, N (см. рис. 2.84).

Для цилиндрического нагревателя с рефлектором эти коэффициенты определяют в такой последовательности:

$$\varphi_{н.к} = \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{R_k}{R_n};$$

$$\varphi_{к.н} = \varphi_{н.к} \frac{r N}{R_k};$$

$$\varphi_{к.р} = 1 - \varphi_{к.н};$$

$$\varphi_{р.к} = \varphi_{к.р} \frac{R_k}{R_p};$$

$$\varphi_{н.р} = 1 - \varphi_{н.к} - \varphi_{н.и};$$

$$\varphi_{н.и} = \frac{r}{R_n} F_1 \left(\frac{R_k}{R_n}; N \right) - F_2 \left(\frac{R_n}{r}; N \right).$$

Эти коэффициенты можно также определить по графику (рис. 2.85).

Для определения F_1 и F_2 используются номограммы (рис. 2.86 и 2.87). Для определения $\varphi_{р.р}$ необходимо оценить параметр S :

$$S = \frac{\pi R_n}{r N} \sqrt{1 - \left(\frac{R_k}{R_n} \right)^2}.$$

Если $S \leq 1$, то

$$\varphi_{р.р} = \frac{R_p - R_n - r}{R_p}.$$

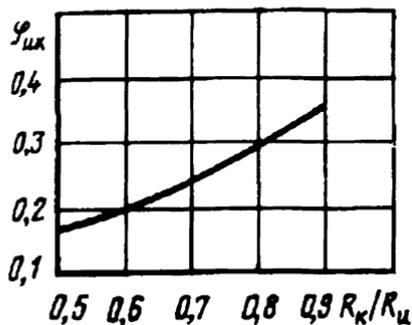


Рис. 2.85. Определение коэффициента $\varphi_{к.к}$.

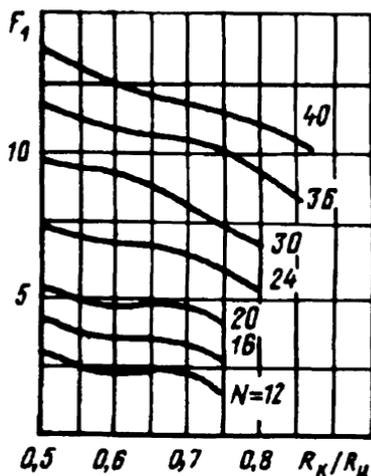


Рис. 2.86. Определение коэффициента F_1

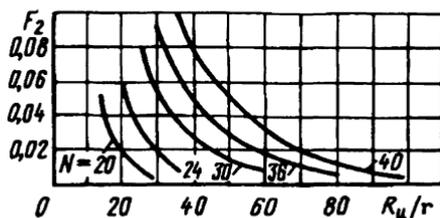


Рис. 2.87. Определение коэффициента F_2

Если $S > 1$, то

$$\varphi_{р.р} = \frac{1}{R_p} \left[R_p - R_k - \frac{R_u + r - R_k}{S} \right].$$

Для ламповых нагревателей, у которых диаметр излучателя очень мал по сравнению с шагом, коэффициент $\varphi_{к.р} = 1$. Тогда

$$\varphi_{р.к} = \frac{R_k}{R_p};$$

$$\varphi_{p,p} = 1 - \varphi_{p,k} = \frac{R_p - R_k}{R_p};$$

$$\varphi_{n,p} = 1 - \varphi_{n,k}.$$

После определения коэффициентов облученности вычисляют безразмерные величины Δ ; γ ; Δ_1 :

$$\Delta = 1 - C_p (\varphi_{p,p} + C_k \varphi_{k,p} \varphi_{p,k});$$

$$\gamma = C_p (\varphi_{p,k} \varphi_{n,p} - \varphi_{p,p} \varphi_{n,k}) + \varphi_{n,k};$$

$$\Delta_1 = 1 - C_p (\varphi_{p,p} + \varphi_{k,p} \varphi_{p,k}).$$

И только теперь определяют искомые плотности тепловых потоков по формулам (2.79) — (2.81).

Используя номограмму (рис. 2.88), можно найти температуру стенки рефлектора.

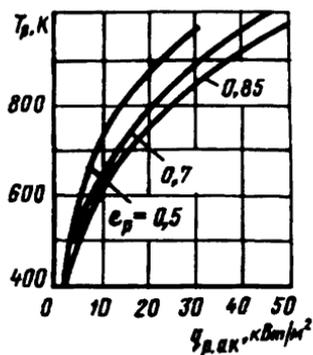


Рис. 2.88. Определение температуры рефлектора T_p

Расчет кривой нагрева начинают с разбиения диапазона температур, в котором производится нагрев, на интервалы примерно через 50 — 100°C, до температуры, превышающей на 100°C расчетную.

Далее определяется энергия, поглощаемая нагреваемым объектом за единицу времени (за 1 час), по следующей зависимости:

$$q_{пг} = N W_{п} \eta_{п} \left(1 - \frac{A_p}{2} \right) A_m \varphi \Delta \tau, \quad (2.85)$$

где N — число ламп, приходящихся на единицу площади нагреваемой панели, шт./м²; $W_{п}$ — потребляемая мощность излучателя, Вт; $\eta_{п}$ — КПД излучателя (отношение излучаемой мощности к потребляемой); A_p — среднее значение коэффициента поглощения рефлектора; A_m — коэффициент поглощения материала панели; φ — коэффициент многократного отражения; τ — промежуток времени, ч.

Число N определяется как

$$N = \frac{1}{Lh},$$

где L — рабочая длина излучателя; h — расстояние между излучателями.

Мощность излучателя берется из справочника. КПД можно принимать от 0,85 до 0,95. A_p определяется по таблицам, в среднем $A_p = 0,2$.

Коэффициент многократного отражения

$$\varphi = \frac{1}{1 - (1 - A_m)(1 - A_p)},$$

A_m определяют по таблицам.

Для пограничных значений температурных интервалов определяем конвекционные и радиационные потери за единицу времени (1 ч) по следующим формулам:

$$q_{\text{конв}} = \alpha (t_m - t_v) \Delta \tau,$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); t_m — температура материала панели; t_v — температура воздуха; $\Delta \tau$ — интервал времени нагрева.

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = A \sqrt[3]{\Delta t},$$

где $\Delta t = t_m - t_v$.

Коэффициент A находят по табл. 2.6 в зависимости от $\bar{t} = \frac{1}{2}(t_m + t_v)$.

Т а б л и ц а 2.6

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА A ОТ \bar{t}

\bar{t}	20	50	100	200	300	500
A	1,35	1,27	1,14	0,97	0,85	0,70

$$q_{\text{рац}} = \frac{A_m A_p \sigma_0}{1 - (1 - A_m)(1 - A_p)} \left[\left(\frac{T_m}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 \right] \Delta \tau,$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана — Больцмана; T_m и T_p — абсолютные температуры нагреваемой панели и рефлектора, К.

Энергию $q_{\text{нагр}}$, затрачиваемую на нагрев 1 м^2 панели, можно рассчитать по формуле

$$q_{\text{нагр}} = c \delta \rho \Delta t ,$$

где c — удельная теплоемкость материала панели, Дж/(кг·К); δ — приведенная толщина панели (с учетом силового набора); ρ — плотность материала панели, кг/м³; Δt — температурный интервал нагрева.

Для граничных значений температурных интервалов величина Δt определяется по следующей формуле:

$$\Delta \tau = \frac{c \delta \rho}{q_{\text{нагр}}} \Delta t .$$

Подсчитывая величину $\Delta \tau / \Delta t_{\text{м}}$, строят вспомогательный график (рис. 2.89), где $t_{\text{м}}$ — граничные значения температурных интервалов.

Далее, произведя графическое интегрирование

$$\tau = \int_0^t f(t_{\text{м}}) dt_{\text{м}}$$

(заштрихованная площадь на рис. 2.89 соответствует времени изменения температуры), строят график $t_{\text{м}} = f(\tau)$ (рис. 2.90) и определяют, может ли нагревательная установка за определенное время нагреть панель до заданной температуры.

Индукционный нагрев основан на том, что переменное магнитное поле в спиральной катушке-индукторе возбуждает переменное магнитное поле в нагреваемой конструкции-проводнике, расположенном в этой катушке или вблизи ее. При этом в нагреваемой конструкции индуцируется электродвижущая сила, вызывающая появление электрического поля. Теплота, выделяемая этим током, нагревает конструкцию. Принципиальные электрические схемы установок, используемых для индукционного нагрева, показаны на рис. 2.91. В установках для поверхностного нагрева индуктор подключают к генератору через понижающий

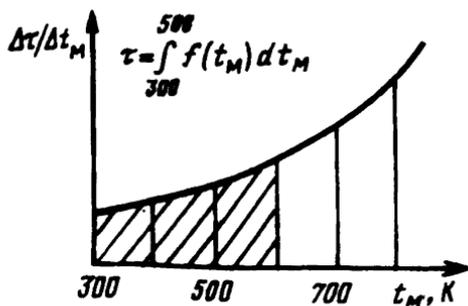


Рис. 2.89. Графическая интерпретация зависимости $\Delta \tau / \Delta t_{\text{м}} = f(t_{\text{м}})$

трансформатор (рис. 2.91,а). Нагреватели с многотоковым индуктором подключают обычно к генератору без трансформатора (рис. 2.91,б).

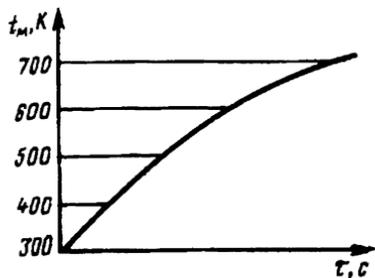


Рис. 2.90. Кривая нагрева
 $t_m = f(\tau)$

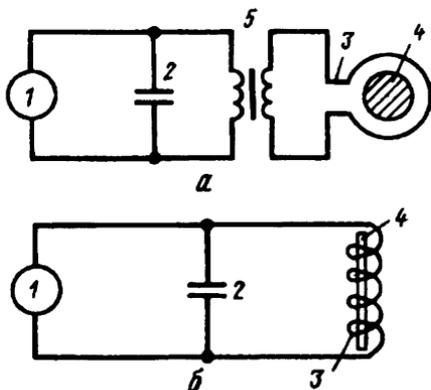


Рис. 2.91. Принципиальные электрические схемы установок для индукционного нагрева:
а - с понижающим трансформатором;
б - без понижающего трансформатора;
1 - генератор; 2 - конденсаторная батарея;
3 - индуктор; 4 - нагреваемое тело;
5 - понижающий трансформатор

По применяемым частотам индукционные установки разделяют на установки с промышленной, повышенной и высокой частотой, подразумевая под повышенными частотами диапазон от 500 до 10 000 Гц, а под высокими — от 70 кГц и выше.

Преимущества индукционного нагрева: возможность прямого нагрева проводниковых материалов, что повышает эффективность нагрева материалов и исключает перенос массы с нагревателя на образец; возможность применения этого метода в условиях вакуума и защитных сред.

Тепловой поток в нагреваемом теле определяется по формуле

$$\Phi = cI^2R,$$

где Φ — тепловой поток, Вт; I — ток, А; R — сопротивление тела — проводника, Ом; c — поправочный коэффициент, учитывающий рассеивание магнитного поля в пространстве между нагреваемым телом и соленоидом:

$$c = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \epsilon ,$$

D_1 — диаметр нагреваемого тела; D_2 — диаметр витков соленоида; ϵ — постоянная, характеризующая удаленность витков от поверхности нагреваемого тела и принимаемая равной 1 — 1,3. С уменьшением зазора между нагреваемым материалом и соленоидом КПД нагревателя повышается. Глубина проникновения вторичного тока в нагреваемый материал определяется по уравнению

$$\delta = 50,3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} ,$$

где δ — глубина, см; ρ — удельное сопротивление материала, Ом · мм²/м; μ — магнитная проницаемость материала, Ом · с/см; f — частота тока, Гц.

Отсюда видно, что глубина проникновения тока уменьшается с повышением частоты тока, а при повышении частоты увеличивается энергия, выделяемая в том же объеме, т.е. увеличивается ее концентрация.

При соответствующей конструкции охлаждаемых индукционных катушек можно получить плотность теплового потока до 2000 кВт/м². При этом температура нагрева образцов может быть 700 К и выше, а темп нагрева — до 200 К/с.

Индукционный нагрев принципиально может быть применен в двух вариантах:

1. Наведение токов непосредственно в испытуемом объекте.
2. Нагрев при помощи промежуточного (например, вольфрамового) цилиндра.

Второй вид индукционного нагрева по воздействию на образец аналогичен лучистому нагреву.

К недостаткам индукционного метода нагрева следует отнести ограничения, связанные с электропроводностью образца, громоздкость вспомогательного оборудования для генерирования токов высокой частоты.

Кондуктивный нагрев воспроизведения температурных условий на элементах конструкции ЛА за счет теплообмена теплопроводностью заключается в том, что теплота распространяется в рабочем теле посредством передачи кинетической энергии от более нагретых молекул к менее нагретым, находящимся с ними в соприкосновении.

Испытуемую конструкцию обкладывают нагревательными элементами, состоящими из металлических лент, обшитых (обклеенных) электроизолирующими материалами. При подаче электриче-

ского тока на металлическую ленту происходит нагревание ее, и тепло передается на конструкцию. Изменяя подаваемую электрическую мощность, можно изменить интенсивность нагревания конструкции, т.е. вести программный нагрев и воспроизводить нестационарные температурные поля. Такие устройства называются «тепловыми одеялами» и изготавливаются из нихромовых лент, изолированных стеклотканью. Максимальная температура, получаемая на поверхности конструкции ЛА при использовании метода кондуктивного нагрева, достигает 350 К, а плотность теплового потока — 20 кВт/м².

Плотность теплового потока вследствие теплопроводности по направлению от нагревателя к поверхности конструкции определяется по закону Фурье из выражения

$$q = -\lambda \left(\frac{dt}{dx} \right),$$

где λ — коэффициент теплопроводности тела; dt/dx — изменение температуры тела на единицу длины.

Количество теплоты определяется как

$$Q = qF\tau .$$

В реальных условиях на тепловых испытательных стендах, где между нагревательным элементом и поверхностью испытуемого объекта проходит тепловой поток, возникает контактный теплообмен.

Особенности передачи тепла в зоне контакта «тепловых одеял» и конструкции ЛА связаны с возникновением термических сопротивлений контакта, которые изменяются в широком диапазоне в зависимости от различных факторов. К таким факторам относятся: физические свойства материала контактной пары; сила сжатия; чистота обработки контактных поверхностей; газовая среда в зоне контакта; температура в зоне контакта; окисные пленки на контактных поверхностях; характер гальванических покрытий контактных поверхностей.

Различают в основном два вида взаимодействия соприкасающихся под нормальной нагрузкой поверхностей: механическое, обусловленное деформацией, и молекулярное, обусловленное взаимодействием атомов сближенных тел.

При механическом взаимодействии давление на отдельных участках контакта достигает нескольких сотен паскалей. Под этим давлением вследствие гетерогенности в строении поверхностей их элементы взаимно внедряются. При молекулярном взаимодействии образуются более прочная связь и происходит схватывание металлов.

Касание реальных поверхностей вследствие их шероховатости всегда происходит в отдельных пятнах, причем суммарная площадь касания двух поверхностей составляет ничтожную долю общей пло-

щади поверхности. С увеличением давления площадь касания возрастает. Схема реального контакта двух поверхностей показана на рис. 2.92.

Процесс теплопередачи при соприкосновении двух тел, поверхности которых имеют реальную шероховатость, носит совершенно другой характер. Контакт в этом случае является неполным, и в зоне контакта возникает определенный температурный скачок Δt_k .

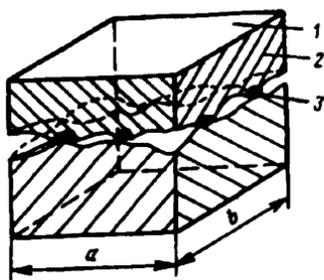


Рис. 2.92. Контактное взаимодействие двух твердых поверхностей:
1 - номинальная площадь; 2 - контурная площадь; 3 - фактическая площадь контакта

Температурный скачок указывает на определенное термическое сопротивление в зоне контакта, которое может быть выражено формулой

$$R_{\tau} = \Delta \frac{t_k}{q}.$$

На рис. 2.93,а и б приведены примеры двух возможных случаев распределения температур с учетом контактных сопротивлений, всегда создающих температурный скачок.

Зона контакта имеет сравнительно небольшую толщину, и ее теплофизические свойства отличаются от свойств материалов контактирующих тел. Поэтому зону контакта можно условно представить в виде дополнительной стенки с особыми свойствами, по толщине которой происходит температурный перепад, равный температурному скачку (рис. 2.94).

Если принять, что дополнительная стенка (зона контакта) в случае одноименной контактной пары должна иметь ту же теплопроводность, что и соприкасающиеся тела, то ее толщину можно определить из следующего соотношения:

$$\frac{t_1' - t_1''}{\delta_1} = \frac{\Delta t_k}{\delta_2} = \frac{t_3' - t_3''}{\delta_3},$$

откуда

$$\delta_2 = \delta_1 \frac{\Delta t_{\kappa}}{t_1' - t_1''} = \delta_3 \frac{\Delta t_{\kappa}}{t_3' - t_3''} .$$

Так как через зону контакта в единицу времени проходит такое же количество теплоты, как и через соприкасающиеся тела, то, задавшись определенной толщиной дополнительной стенки, можно определить ее теплопроводность:

$$q = \lambda_1 \frac{t_1' - t_1''}{\delta_1} = \lambda_2 \frac{\Delta t_{\kappa}}{\delta_2} = \lambda_3 \frac{t_3' - t_3''}{\delta_3} ,$$

откуда

$$\lambda_2 = \frac{t_1' - t_1''}{\Delta t_{\kappa}} \cdot \frac{\delta_2}{\delta_1} \lambda_1 = \frac{t_3' - t_3''}{\Delta t_{\kappa}} \cdot \frac{\delta_2}{\delta_1} \lambda_3$$

или

$$\lambda_2 = q \frac{\delta_2}{\Delta t_{\kappa}} .$$

Многочисленные исследования контактного теплообмена показали, что на теплопроводные свойства зоны контакта оказывают влияние два компонента: твердая часть контактирующих тел и газообразная

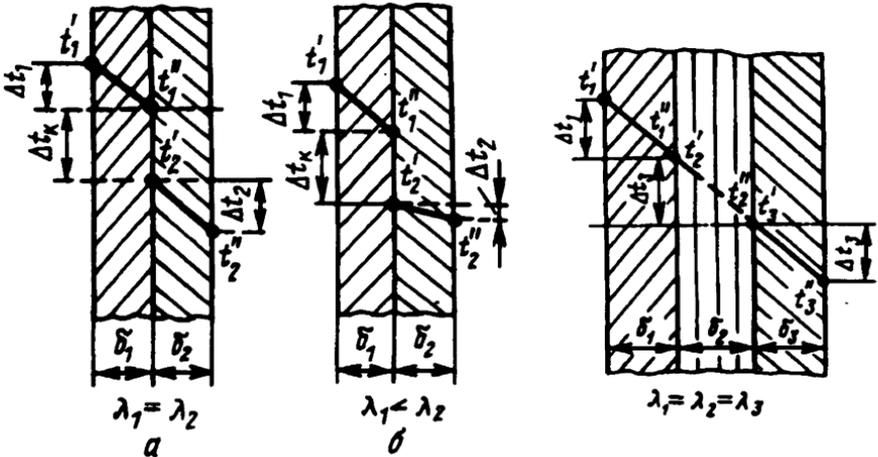


Рис. 2.93. Распределение температуры при контакте двух пластин с шероховатой поверхностью

Рис. 2.94. Распределение температуры при неполном контакте пластин с дополнительной стенкой

среда, заполняющая промежутки между неровностями поверхностей. Поэтому в действительности процесс распространения теплоты осуществляется за счет теплопроводности по контактирующим поверхностям, конвекции и теплового излучения. Такой сложный теплообмен через зону контакта обуславливает значительное сопротивление.

Электронный нагрев основан на принципе преобразования в теплоту энергии пучка ускоренных в электрическом поле электронов при встрече пучка с поверхностью исследуемого образца. Этот метод нагрева позволяет достаточно хорошо моделировать взаимодействие материала гиперзвуковых и воздушно-космических ЛА с частицами при входе в плотные слои атмосферы. Плотность тепловых потоков при этом методе нагрева достигает значений $q = 10^5$ кВт/м². Электронный нагрев позволяет контролировать тепловыделение в образце по значению электронного тока, что особенно важно при исследованиях теплофизических и термодинамических характеристик материала.

Электронный нагрев осуществляется либо посредством создания термоэлектронного тока между нагретым катодом и образцом-анодом (метод электронной бомбардировки), либо посылкой на образец пучка электронов, сформированного вне зоны нагрева (электронно-лучевой нагрев).

Первый метод конструктивно более прост, однако может использоваться только в случае электропроводных образцов и требует наличия катода с высоким потенциалом в непосредственной близости от образца, чтобы нагреваемый образец находился в электрическом поле нагревателя.

Второй метод существенно сложнее, поскольку для формирования электронного луча требуется наличие катода специальной формы, элементов формирования и фокусирования электронного луча. При использовании таких установок (электронных пушек) источник электронов и ускоряющий электрод могут быть удалены на значительное расстояние от образца и образовывать практически автономную систему.

В настоящее время существуют электронные пушки, работающие по следующим принципиальным схемам: аксиальная электронно-лучевая пушка, радиальная система, или многопушечный электронный излучатель, магнетронная электронно-лучевая пушка.

Аксиальная электронно-лучевая пушка (рис. 2.95) является наиболее распространенной системой. Она представляет собой двухэлектродный излучатель с термоэмиссионным катодом. В зависимости от мощности пушки используются либо прямоканальные катоды (для малых мощностей), либо катодный блок с косвенным подогревом (для больших мощностей).

После прохождения через анодное отверстие электронный луч фокусируется магнитными линзами. В большинстве конструкций приме-

няются электромагнитные системы управления и развертки луча. Для устойчивой работы пушки рабочий вакуум в анодно-катодной камере должен поддерживаться в пределах $1,33 \cdot 10^2$ Па. Для стабилизации разрежения анодно-катодная камера соединяется с рабочей камерой, где находится объект, нагреваемый через лучепровод, имеющий достаточно высокое вакуумное сопротивление, а в некоторых случаях используются одна или две ступени промежуточной откачки.

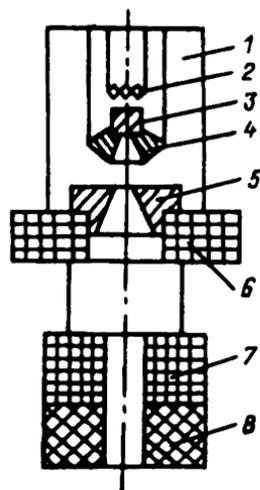


Рис. 2.95. Схема аксиальной электронно-лучевой пушки:

1 - анодно-катодная камера; 2 - вспомогательный катод; 3 - рабочий катод; 4 - фокусирующий электрод; 5 - анод; 6, 7 - магнитные линзы; 8 - система отклонения и развертки луча

Радиальная система (рис. 2.96) состоит из многопучечной композиции, включающей от 6 до 12 «элементарных пушек» — катодов. Каждая из них представляет собой плоскосимметричный электронный излучатель с линейным катодом прямого накала (рис. 2.97). Такой многопучечный блок с кольцевым расположением пушек устанавливается над испытуемым образцом соосно с ним. Для более устойчивой работы системы и ее фокусировки вводится магнитное или электростатическое отклонение пучка.

Существенным отличием магнетронных пушек (рис. 2.98) является то, что электронный пучок располагается в продольном магнитном поле соосно с электрическим полем. Магнитное поле участвует в формировании, управлении и проведении пучка электронов от катода до нагреваемого объекта. Преимуществом пушки магнетронного типа является простота геометрической формы электродов и меньшие по сравнению с аксиальной электронно-лучевой пушкой требования к точности взаимного расположения.

Метод нагрева образцов пропусканием тока заключается в том, что непосредственно по образцу пропускается электрический ток

большой плотности и малого напряжения. Такой метод пригоден только для электропроводных образцов. Основное его преимущество — тепловыделение непосредственно в образец, что позволяет уменьшить постоянную времени нагрева и тепловые потери. Согласно закону Джоуля — Ленца за время $d\tau$ в элементарном объеме образца в виде цилиндра выделяется количество теплоты, которое можно определить по следующей зависимости:

$$dQ = \rho i^2 dV d\tau ,$$

где $dV = dS dl$ — величина элементарного объема, m^3 ; i — плотность тока, A/m^2 ; ρ — удельное электрическое сопротивление, $Om \cdot m$.

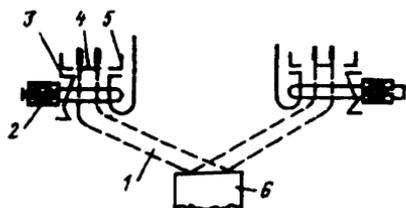


Рис. 2.96. Схема многопушечного блока с кольцевым расположением пушек: 1 — электронная пушка; 2 — отклоняющая электронная пушка; 3 — анод; 4 — катод; 5 — фокусирующий электрод; 6 — испытуемый объект

Зависимость теплового потока от силы тока можно представить в следующем виде:

$$\Phi = \rho i^2 . \quad (2.86)$$

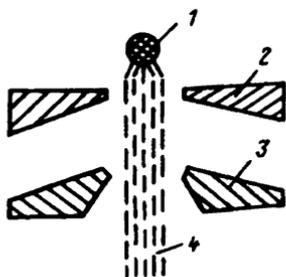


Рис. 2.97. Схема плоскосимметричного электронного излучателя с линейным катодом прямого канала: 1 — катод; 2 — фокусирующий электрод; 3 — анод; 4 — электронный луч

Зависимость (2.86) справедлива для однородного участка электрической цепи. Для конкретных стенов необходимо вводить корреляционный коэффициент k :

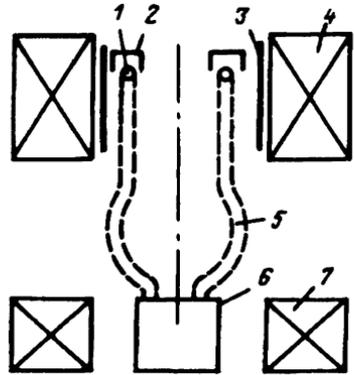
$$\Phi = k \rho i^2.$$

Глубина проникновения Δ электрического тока определяется по формуле

$$\Delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}.$$

Так, например, для образца из стали Х18Н9Т при $f = 50$ Гц, $\rho = 2 \cdot 10^{-5}$ Ом·см, взятого при $T = 673$ К и $\mu = 1$ В·с/(А·см), глубина проникновения электрического тока составит $\Delta = 32$ мм.

Рис. 2.98. Схема магнетронной пушки:
 1 - катод; 2 - фокусирующий электрод;
 3 - анод; 4 - формирующая магнетронная катушка;
 5 - электронный пучок; 6 - испытуемый объект;
 7 - фокусирующая магнитная катушка



Непосредственное пропускание тока через образец является простым и экономичным методом нагрева с темпом изменения температуры порядка 700 — 900 К/с. К преимуществам такого метода относится возможность программного нагрева и непосредственного наблюдения поверхности образца во время испытаний.

Однако этот метод имеет существенные недостатки:

— невозможно получить однородное температурное поле по рабочей длине образца, поскольку распределение температур имеет параболический характер, причем температура образца при удалении от его середины резко понижается. Неравномерность прогрева объясняется отводом тепла в захваты;

— пропускание больших токов через образец может привести к локальным его перегревам и изменению структур, что вызовет искажение результатов механических испытаний;

— значительный перепад температуры по радиусу, который наблюдается у образцов из материалов с малым коэффициентом теплопроводности, вносит погрешность в изменяемые прочностные характеристики;

— температуру образца, нагретого током, практически невозможно измерить с необходимой точностью с помощью привязанных и даже приваренных к его поверхности термопар. Термопары показывают температуру, заниженную по сравнению с действительной на десятки градусов. Так, при температуре 1000°C температура, измеренная приваренной к поверхности образца в середине его рабочей длины термопарой, будет отличаться на $50 - 70^{\circ}\text{C}$ от температуры, замеренной на оси образца;

— на показания термопар влияет паразитная ЭДС, развиваемая переменным магнитным током образца во входной цепи усилителей приборов регистрации температуры;

— по сечению образца возникают температурные напряжения, которые могут привести к его разрушению.

2.3.2.

Тепловакуумные испытания

Тепловакуумные испытания КЛА и его элементов являются комплексными (многофакторными) испытаниями, так как на испытуемый объект одновременно воздействуют как минимум два фактора — температура, диапазон которой может колебаться от -130°C до $+150^{\circ}\text{C}$, и пониженное давление окружающей среды.

Целью таких испытаний является отработка конструкции КЛА и его систем на функционирование, определение предельных возможностей испытуемого объекта, определение прочностных характеристик конструкции, определение фактического устройства теплоизоляции КЛА, а также уточнение математической модели тепловых режимов КЛА в целом и его элементов.

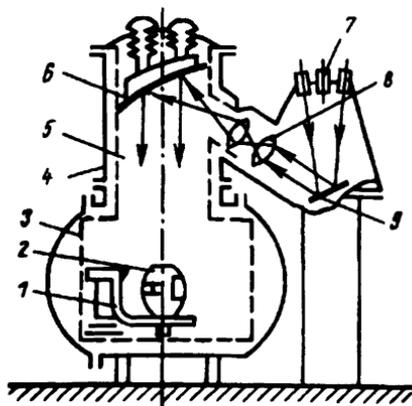


Рис. 2.99. Схема тепловакуумной камеры «Дженерал электрик» с ИСИ неосевой оптической схемы:
 1 - система вращения объекта испытаний;
 2 - объект испытаний; 3 - криоэкраны;
 4 - корпус ТВК; 5 - оптический отсек камеры; 6 - параболическое зеркало;
 7 - ксеноновая дуговая лампа;
 8 - линзовая система; 9 - плоское зеркало

Тепловакуумные испытания имеют следующие особенности:

1. При их проведении, когда исследуются процессы теплообмена элементов КА между собой и с окружающей средой, необходима имитация тепловой части внешнего электромагнитного излучения, имитация поглощения излучения космическим пространством и вакуума в пределах 10^{-3} — 10^{-4} Па.

2. Особое влияние на тепловое состояние оказывают вакуум (в табл. 2.7 приведены ориентировочные уровни вакуума, необходимого для имитации в стендовых условиях различных физических явлений, характерных для космического пространства), жесткие составляющие электромагнитного излучения, включая ультрафиолетовое, потоки протонов и электронов и др.

3. При отработке работоспособности узлов трения, электроконтактных механизмов, пиросредств, уплотнений в условиях космического пространства необходима имитация явлений десорбции поверхностных пленок, диффузии твердых веществ в вакууме. Для этого кроме воспроизведения внешних тепловых потоков требуется имитация более высокого вакуума (10^{-6} — 10^{-8} Па).

Т а б л и ц а 2.7

УРОВНИ ВАКУУМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Явления, исследуемые в вакууме	Требуемый вакуум, Па
Механическая прочность герметичных корпусов КЛА при воздействии перепада давлений	$1,3 \cdot 10^3$
Конвективная теплопередача	От 10^{-5} до $1,3 \cdot 10^{-2}$
Теплопередача излучением	Ниже $1,3 \cdot 10^{-2}$
Диэлектрическая прочность	Ниже $1,3 \cdot 10^{-3}$
Электрические разряды и пробы	Ниже $1,3 \cdot 10^{-5}$
Процессы в ионных и плазменных двигателях	Ниже $1,3 \cdot 10^{-5}$
«Холодная» сварка	Ниже $1,3 \cdot 10^{-5}$
Поверхностные эффекты	От $1,3 \cdot 10^{-5}$ до $1,3 \cdot 10^{-7}$
«Сухое трение»	От $1,3 \cdot 10^{-5}$ до $1,3 \cdot 10^{-12}$
Химическое взаимодействие остаточного газа	От $1,3 \cdot 10^{-5}$ до $1,3 \cdot 10^{-12}$

В качестве экспериментальных средств для проведения тепловакуумных испытаний используют вакуумные камеры различных объемов, где размещаются имитаторы солнечного и планетного излучения, а также экраны, охлаждаемые криогенными жидкостями для обеспечения «черноты» и «холода» космического пространства.

На рис. 2.99 показана принципиальная схема тепловакуумной камеры «Дженерал электрик» с искусственной системой излучения (ИСИ) неосевой оптической схемы.

2.3.3.

Теплостатические испытания

Необходимость проведения теплостатических испытаний КЛА или его элементов возникает в тех случаях, когда на конструкцию в процессе эксплуатации действуют одновременно такие нагрузки, как высокие и низкие температуры, статические, вибрационные и линейные инерционные перегрузки, ударные нагрузки, акустические воздействия и т.д.

На примере изменения удельной прочности в зависимости от температуры (рис. 2.100) можно показать, что с повышением температуры удельная прочность материалов σ_b / γ , т.е. отношение предела прочности σ_b к удельному весу γ , снижается, и при определенной критической температуре один материал необходимо заменить другим, более жаропрочным (стойким). Изучение влияния длительности воздействия повышенных температур на механические характеристики конструкционных материалов особенно важно, когда температуры элементов конструкции близки к пределу применимости материалов, а также когда конструкция предназначена для длительной эксплуатации.

Классическая методика проведения статических испытаний предусматривает постепенное увеличение нагрузки, прикладываемой к конструкции ЛА небольшими ступенями. Величина ступеней обычно не превышает 10% от расчетной нагрузки.

При теплостатических испытаниях ЛА такая методика не годится. Необходимо согласовывать по времени программы нагружения и нагревания, для того чтобы получить те же комбинации тепловых и механических нагрузок, которые имеют место в полете. Силовое и тепловое нагружения на элементы конструкции ЛА являются известными функциями времени. В процессе тепловых механических испытаний целесообразно воспроизводить нагрузки и температурные поля в натурном масштабе времени, причем из всех возможных траекторий следует выбирать ту, для которой сочетание нагрузок и температур наименее благоприятно по условиям прочности. Однако не всегда удается

однозначно определить самую опасную расчетную траекторию. На одной из них могут быть, например, максимальные нагрузки и невысокие температуры, а на другой, наоборот, самые высокие температуры, но небольшие нагрузки. В этом случае испытания должны предусматривать проверку прочности ЛА при температурных полях и нагрузках, соответствующих всем опасным траекториям.

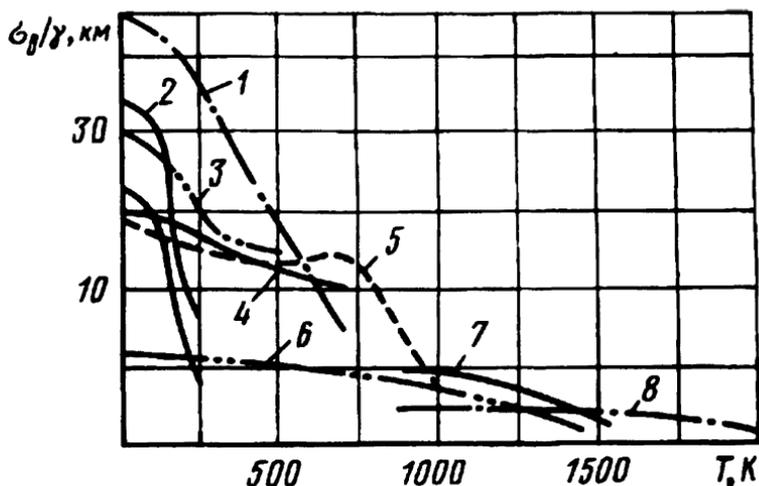


Рис. 2.100. Зависимость удельной прочности σ_B/γ материалов от температуры: 1 — бериллиевый сплав (до 870 К); 2 — алюминиевые сплавы (длительно — до 420 К, кратковременно — до 520 К); 3 — титановые сплавы (до 770 К); 4 — сталь (до 870 — 920 К); 5 — никелевые сплавы (до 1170 К); 6 — ниобиевый сплав (до 1570 К); 7 — молибденовый сплав (до 2270 К); 8 — вольфрам (до 2270 К)

Надо помнить, что основным требованием при тепловых и механических испытаниях является наиболее точное по отношению к полетным условиям сочетание тепловых и силовых режимов нагружения, а все допущения, которые предусматриваются коэффициентом безопасности, должны идти в запас прочности.

При выборе программ тепломеханических испытаний необходимо помнить, что основным требованием является воспроизведение нестационарных температурных полей, так как именно они представляют наибольший интерес для какого-либо момента времени, а это можно сделать только при условии воспроизведения полной программы нагрева.

При силовом нагружении элементов конструкции можно отметить, что ее напряженное состояние гораздо меньше зависит от предыстории, чем температурные поля в ней. При отсутствии ползучести материала напряженное состояние можно воспроизвести с хорошей точностью, нагружая конструкцию по произвольной программе. Этот факт значительно упрощает тепломеханические испытания ЛА, и при выборе программы нагружения можно не заботиться об участке нарастания силовой нагрузки до расчетных значений.

Возможны три варианта проведения тепломеханических испытаний (рис. 2.101).

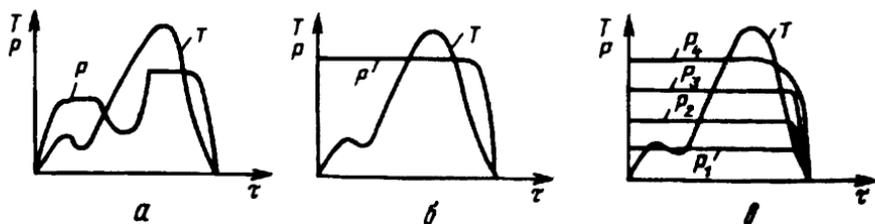


Рис. 2.101. Возможные варианты нагружения элементов конструкции ЛА при тепломеханических испытаниях

1. Проанализировав для расчетной траектории полета температурные поля в конструкции, устанавливают момент времени, когда в ней возникает самое неблагоприятное с точки зрения прочности распределение температур. В найденный момент или моменты времени, если их несколько, нагрузку следует доводить до эксплуатационной или до разрушения ЛА (в зависимости от целей эксперимента). Скорость нагружения нужно выбирать максимальной, какую позволяют мощность системы нагружения и быстродействие управляющей и измерительной систем. Недостатком такой программы является то, что не всегда можно быть уверенным в том, что при выбранной комбинации температур и нагрузок испытываемая конструкция имеет максимальный запас прочности (рис. 2.101,а).

2. От этого недостатка свободен второй вариант программы, когда нагружение производят до начала нагревания, а затем уровень нагрузки поддерживают постоянным в течение всего эксперимента.

По-прежнему воспроизводится самая опасная в отношении прочности программа нагрева (рис. 2.101,б).

3. Третий вариант испытаний проводится по программе, когда уровень нагрузки увеличивается от испытания к испытанию. Программа же нагревания остается в каждом эксперименте постоянной (рис. 2.101,г).

Для ЛА, срок службы которых исчисляется тысячами часов, прямые испытания на полный срок службы практически трудновыполнимы (особенно это относится к многоразовым ЛА). Это усложняет экспериментальные исследования работоспособности элементов конструкции ЛА с учетом длительной эксплуатации в условиях повышенных температур.

В настоящее время разработана методика ускоренных испытаний при стационарных тепловых режимах, которая позволяет предсказывать долгосрочное поведение материалов конструкции на основании результатов испытаний, ограниченных по времени.

Повышение температуры испытываемой конструкции — наиболее реальный путь сокращения длительности испытаний. Длительные испытания можно заменять менее продолжительными, если повысить температуру, используя температурно-временной параметр Ларсона — Миллера $T(C + \lg \tau_*)$, где C — константа; τ_* — время, необходимое для достижения заданной деформации или разрушения, т.е. одно и то же значение параметра соответствует длительному эксперименту при низкой температуре и кратковременному — при высокой.

В работе [5] показано, что если принять $C = 20$ (в этом случае время берется в часах), то для сокращения продолжительности испытаний в 10 раз (с 10000 до 1000 ч) достаточно увеличить температуру на 4,4%.

Таким образом, можно сократить продолжительность эксперимента, используя незначительное повышение температуры испытываемой конструкции, но при этом предъявляются очень жесткие требования к точности эксперимента. Так, например, перегрев во время испытаний конструкции из сплава АК4-1-T2 всего на 5 К (408 К вместо 403 К) приведет к увеличению деформации ползучести примерно в два раза [5].

Метод испытания и определения характеристик материалов, основанный на использовании температурно-временного параметра, называется методом термоэкспозиции.

Методика таких ускоренных испытаний заключается в получении зависимости характеристик испытываемых конструкций от температурно-временного параметра и установлении по полученному параметру соотношений между температурой и временем, которые необходимо задать при проведении испытаний по ускоренной программе.

В качестве примера можно привести соотношения между температурой T и временем τ при проведении ускоренных испытаний конструкций из сплава АК4-1-T1, рассчитанных на эксплуатацию при температуре 403 К в течение 30000 ч (табл. 2.8).

**СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ
УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Т, К	403	423	448	473
τ, ч	3000	3324	280	33,5

2.3.4. Огневые испытания

Проведение огневых испытаний ракетных двигательных установок имеет ряд характерных особенностей:

1. Продолжительность работы двигателя за одно включение — от нескольких секунд до нескольких минут. С этим связана необходимость максимальной автоматизации процессов управления и измерения.

2. Повышенная опасность испытаний, связанная с применением высокоактивных топлив. Так, например, в качестве окислителя используются жидкий кислород, фтор, соединения на основе азотной кислоты. Использование таких веществ позволяет получать высокие температуры в камере сгорания двигателя, что способствует быстрому развитию всевозможных дефектов, которые могут привести к аварийному исходу испытания (пожар, взрыв). Ряд ракетных топлив обладают токсичностью (гидразин и его соединения) и склонностью к взрыву при смешении с воздухом или окислении при различных воздействиях (водород, перекись водорода).

3. Высокая стоимость испытаний, обусловленная большими расходами топливных компонентов и использованием уникального испытательного оборудования.

В связи с этим огневые испытания должны быть высокоинформативными. Так, например, при наземных огневых испытаниях одного из американских ЖРД измерялось 575 параметров [21].

Испытания ракетных двигателей осуществляются на специально оснащенных испытательных станциях (испытательных комплексах).

Испытательные станции состоят из стендов для установки двигателей; наблюдательных бункеров, из которых осуществляется управление процессом испытаний; емкостей для хранения компонентов топлива; химических, измерительных, вычислительных и других лабораторий; производственных и приборных мастерских, монтажных помещений для проведения работ с двигателем до и после испытания; различных

энергетических систем для обеспечения стендов и производственных служб водой, паром, воздухом и инертными газами высокого давления; административных и бытовых помещений, а также вспомогательных служб (ремонтных, транспортных и т.д.).

Испытательные станции должны обеспечивать:

— проведение испытаний в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным;

— соответствие строительных сооружений необходимому для проведения испытаний оборудованию;

— проведение испытаний в любых атмосферных и климатических условиях;

— возможность автоматизации управления испытаниями, процессов измерения и обработки информации;

— универсальность испытательных работ;

— необходимую вентиляцию служебных помещений, глушение шума работающих двигателей, нейтрализацию и удаление продуктов сгорания;

— безопасность и удобство эксплуатации при испытательных работах.

Испытательные стенды, предназначенные для проведения огневых испытаний, представляют собой корпус из монолитного железобетона с мощным стальным каркасом и обычно располагаются на склоне оврагов. Схема вертикального стенда для испытаний мощных ЖРД показана на рис. 2.102.

Все помещения стенда, за исключением бокса 4, — закрытого типа. Для выхода взрывной волны в конструкции стенда предусматриваются легкоразрушаемые элементы — большие окна, легкие крыши боксов и т.д.

Основным помещением стенда является бокс 4 (огневой отсек), расположенный консольно по отношению к корпусу стенда. В огневом отсеке двигатель 5 монтируется к раме тягоизмерительного устройства 8. Над огневым отсеком расположена система измерения и тарировки тяги двигателя. Усилие передается на раму двигателя посредством вертикальных штанг, проходящих через окно в потолке огневого бокса. В верхней части стенда расположены отсеки горючего и окислителя, в которых размещаются топливные расходные баки 10 и 11 с системами термостатирования, системы питания двигателя топливом 6, 12; рядом находятся баллоны со сжатым газом 7 для наддува топливных баков. Для обеспечения гидродинамического подобия в отсеке тягоизмерительного устройства расположены взаимноизолированные разделительные емкости 9.

Ниже нулевой отметки размещены дополнительные топливные баки 13, предназначенные для обеспечения возможности проведения опытных работ на новых, более перспективных компонентах. Наддув баков осуществляется из баллонной 14.

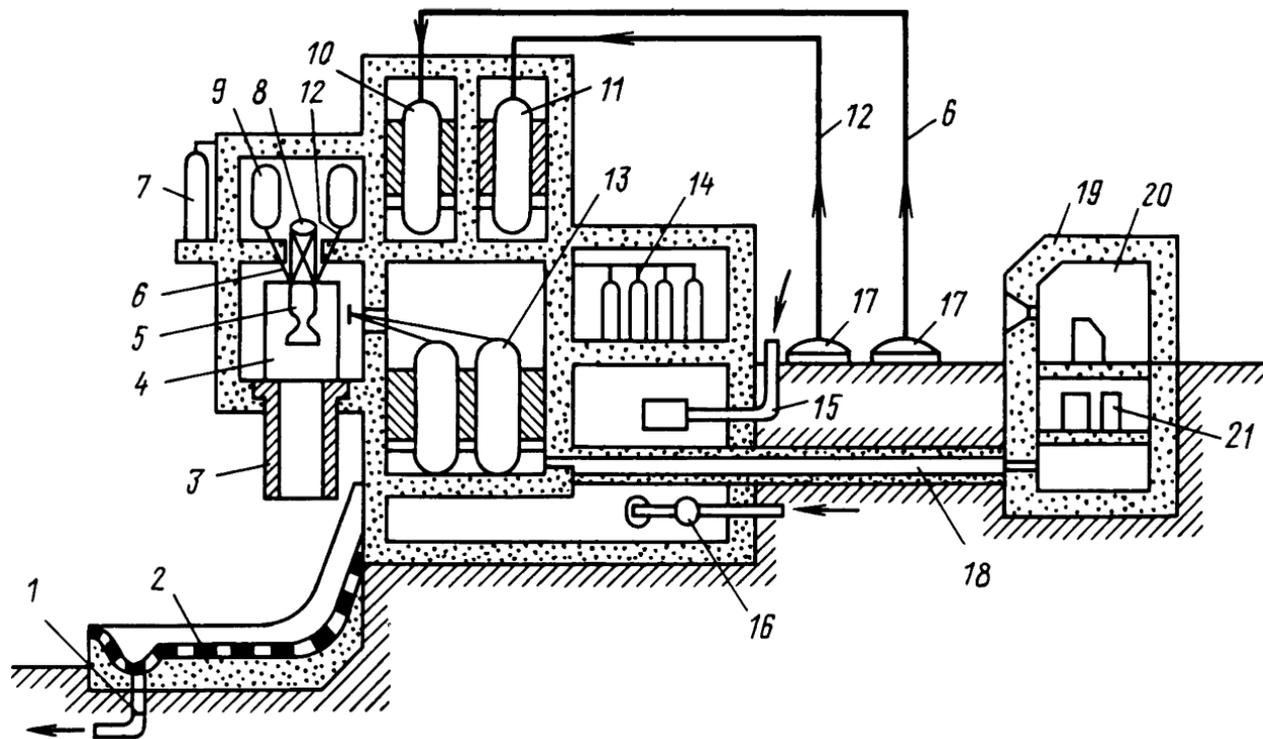


Рис. 2.102. Разрез вертикального стода для огневых испытаний мощных ЖРД

Система отвода продуктов сгорания состоит из следующих элементов:

— газоотводной трубы 3, предназначенной для гашения световой и звуковой струи, или выходного диффузора для обеспечения высотных условий;

— лотков 2 для отвода струи и ее охлаждения с целью предотвращения эрозии стенда; охлаждение струи и лотка производится из специальной системы 16. Отработанная вода по каналу 1 попадает в нейтрализационную систему.

В нижних помещениях размещаются системы отопления, вентиляции 15, связи и оповещения, пожаротушения. На определенном удалении размещается топливозапасник 17.

Обычно пункт управления 19 бронируется и выносится более чем на 100 метров от стенда в зависимости от тяги испытываемого двигателя. Визуальное наблюдение осуществляется через бронестекла, перископические устройства или при помощи телевизионных устройств из пульты 20. В бункере размещены и пульты управления испытаниями, регистрирующие приборы системы измерения 21. Команды из бункера на стенд и получение информации со стенда в измерительную передаются по кабельным каналам, расположенным в тоннеле 18.

Система управления выполняет следующие основные функции:

— автоматический запуск и останов двигателя по заданной программе;

— автоматический контроль за основными параметрами двигателя и в случае необходимости — аварийный останов двигателя;

— автоматическое изменение режимов работы двигателя;

— автоматическое управление стендовыми клапанами, поддержание заданных давлений наддува и продувок;

— контроль наличия компонентов в стендовых баках окислителя и горючего;

— контроль целостности электрических цепей двигателя;

— выдачу стартов и привязочных команд в систему измерения;

— ручное управление стендом и двигателем при подготовке к испытанию и во время испытания.

2.3.5.

Испытания на воздействие отрицательных температур

Воспроизведение низких температур для испытаний конструкций КЛИА в основном осуществляется для решения двух задач:

— охлаждаемые (например, жидким азотом или жидким гелием)

панели выполняют функции криогенных насосов, т.е. обеспечивают вакуум за счет конденсации на их поверхности паров и газов, критические температуры которых выше критической температуры применяемого хладагента;

— использование криогенных жидкостей позволяет получать на поверхностях элементов конструкции КЛА (например, на материалах тепловой защиты) отрицательные температуры, характерные для таких этапов эксплуатации, как орбитальный полет КЛА или эксплуатации КЛА в период предстартовой подготовки.

Воспроизведение на поверхностях конструкции КЛА циклов нагрев-охлаждение позволяет изучать проблемы прочности в условиях так называемого «теплого удара», что не менее важно, чем, например, решение проблем статической или динамической прочности.

Холодильные установки можно разделить на установки:

- для охлаждения до -180°C ;
- для охлаждения до -270°C ;
- для получения сверхнизких температур, ниже -270°C .

Рассмотрим некоторые способы охлаждения, используемые для испытаний конструкции ЛА в условиях воздействия отрицательных температур.

Наиболее простым способом получения холодного воздуха является использование *вихревой трубы* (рис. 2.103).

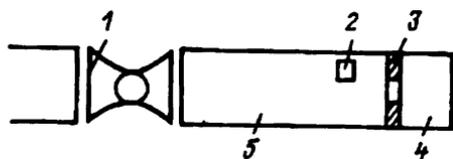


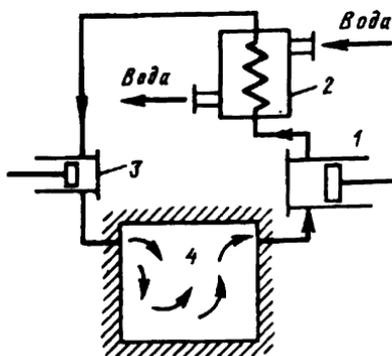
Рис. 2.103. Схема вихревой трубы:
1 - дроссельный вентиль; 2 - сопло; 3 - диафрагма; 4 - холодный конец трубы;
5 - горячий конец трубы

Сущность ее работы состоит в том, что закрученный через тангенциальное сопло 2 сжатый воздух, расширяясь, расслаивается на холодную и горячую составляющие, которые отделяются друг от друга. Холодный воздух выходит через отверстие в диафрагме 3, горячий воздух выходит через другой конец трубы 5, снабженный дросселем 1. КПД вихревой трубы не превышает 0,1 и в семь-восемь раз ниже КПД холодильной машины.

В *воздушной холодильной установке* (рис. 2.104) используется охлаждающий эффект расширения сжатого воздуха. В компрессоре 1 воздух от начального давления p_0 и температуры T_0 сжимается до давления p_k . При этом температура воздуха T_k будет значительно выше температуры окружающей среды. Сжатый воздух поступает в теплообмен-

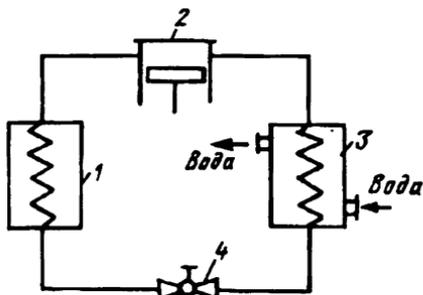
ник 2, охлаждается окружающим воздухом или водой до температуры T_3 , теряя при этом теплоту Q_1 . Сжатый и охлажденный воздух поступает в детендер 3, в котором расширяется до начального давления p_0 . В процессе расширения воздуха температура его падает значительно ниже температуры окружающей среды. Из детендера холодный воздух поступает в охлаждаемое помещение 4, охлаждает окружающие предметы, получая от них теплоту Q_2 , нагревается до температуры T_1 и вновь поступает в компрессор.

Рис. 2.104. Схема воздушной холодильной установки:
1 - компрессор; 2 - теплообменник;
3 - детендер; 4 - охлаждаемое помещение



В паровой компрессорной холодильной установке (рис. 2.105) получение холода обеспечивается за счет изменения агрегатного состояния охладителя — кипения его при низких температурах с отводом от охлаждаемого тела необходимой теплоты парообразования с последующей конденсацией паров за счет предварительного повышения давления и температуры с дальнейшим понижением температуры хладагента.

Рис. 2.105. Схема компрессорной холодильной установки:
1 - испаритель; 2 - компрессор;
3 - конденсатор; 4 - вентиль



В испарителе при низком давлении происходит кипение хладагента с поглощением теплоты охлаждающего тела (ограниченного объе-

ма). Влажный пар хладагента всасывается и сжимается адиабатно компрессором 2, который подает его при более высоком давлении (и температуре) в конденсатор 3. Конденсат хладагента пропускается через редукционный регулирующий вентиль 4, в котором давление снижается до давления всасывания в компрессоре, и хладагент вновь поступает в испаритель.

Работа *термоэлектрического холодильника* (рис. 2.106) основана на том, что при пропускании постоянного тока через цепь, составленную из двух разнородных металлов или полупроводников, на одном из спаев теплота выделяется, а на другом поглощается (эффект Пельтье). Термоэлемент состоит из двух последовательно соединенных полупроводников. При пропускании электрического тока на одном спае (T_x) теплота поглощается, на другом (T_r) — выделяется; если на спае T_r теплоту интенсивно отбирать, то спай T_x охладится и может служить холодильным устройством. Особенно эффективны полупроводниковые охлаждающие устройства.

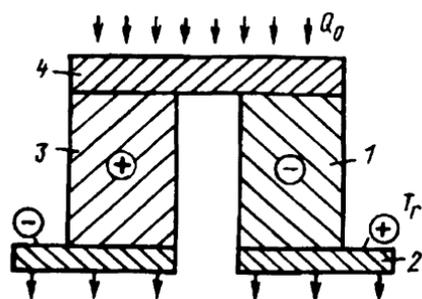


Рис. 2.106. Схема термоэлектрического холодильника:
1 — электронный полупроводник;
2 — горячий спай; 3 — дырочный полупроводник; 4 — холодный спай

В абсорбционной холодильной установке (рис. 2.107) для сжатия паров хладагента используется не механический компрессор, а термохимический. Так, например, если в качестве рабочего тела использовать водоаммиачный раствор, то аммиак выполняет роль хладагента, а вода — абсорбента. В этом случае хладагент (аммиак) должен иметь низкую температуру кипения и растворяться или поглощаться рабочим телом, которое может быть как жидким, так и твердым.

В генераторе 1 при подводе внешней теплоты Q' происходит выпаривание хладагента из концентрированного водоаммиачного раствора при максимальном давлении в системе. Получающийся из водоаммиачного раствора аммиак поступает в конденсатор 2, где конденсируется при том же давлении, отдавая теплоту Q_1 , а слабый водоаммиачный раствор для обогащения аммиаком направляется в абсорбер 5 через регулирую-

щий вентиль 7. Жидкий аммиак из конденсатора 2 поступает через регулирующий вентиль 3 в испаритель 4, в котором давление значительно ниже, чем в генераторе 1 и конденсаторе 2. В испарителе аммиак кипит с поглощением теплоты Q_2 охлаждаемого холодильной установкой тела (или помещения). Из испарителя пары аммиака поступают в абсорбер 5, где они поглощаются слабым водоаммиачным раствором, перетекающим через регулирующий вентиль 7 из генератора 1.

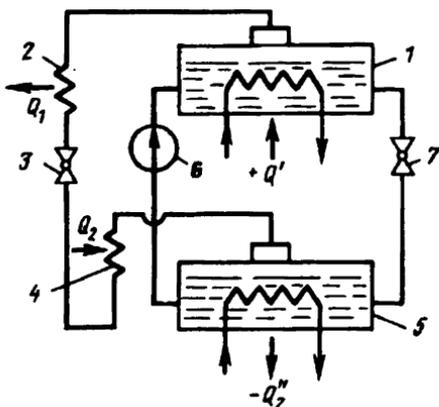


Рис. 2.107. Схема абсорбционной холодильной установки:

- 1 - генератор; 2 - конденсатор;
3 - редукционный вентиль; 4 - испаритель;
5 - абсорбер; 6 - насос; 7 - регулирующий вентиль

Процесс в абсорбере идет с выделением теплоты и при минимальном для всей системы давлении. Интенсивное поглощение аммиака в абсорбере как бы отсасывает аммиачные пары из испарителя и тем самым поддерживает в нем непрерывный процесс кипения. Выделяющаяся в абсорбере теплота Q_2'' поглощается системой охлаждения (водяной или воздушной). Так как давление в генераторе значительно выше, чем в абсорбере, то движение паров аммиака из генератора в конденсатор и далее из конденсатора через регулирующий вентиль в испаритель, а также движение слабого раствора из генератора в абсорбер осуществляются под действием перепада давления. Перекачивание крепкого водоаммиачного раствора из абсорбера в генератор производится насосом 6. Следовательно, для работы абсорбционной холодильной установки механической энергии для привода насоса требуется значительно меньше, чем для привода компрессора. Абсорбционная установка, рассчитанная на работу с малым перепадом давления между генератором и абсорбером, может быть выполнена безнасосной. В этом случае движение водоаммиачного раствора осуществляется благодаря разности его плотностей на различных участках контура циркуляции, т.е. используется так называемая термосифонная циркуляция.

2.4.

Испытания на воздействие климатических факторов

Цель климатических испытаний элементов, узлов, агрегатов и ЛА в целом сводится к определению устойчивости и прочности испытуемых объектов при воздействии на них климатических факторов. К таким факторам относятся:

— повышенная и пониженная температура окружающей атмосферы; максимальные значения температур при таких испытаниях могут колебаться от $+(70\pm 5)^{\circ}\text{C}$ до $-(60\pm 5)^{\circ}\text{C}$;

— повышенная или пониженная влажность окружающей атмосферы; так, например, для тропического климата максимальная относительная влажность составляет 95% при температуре 35°C , а минимальная относительная влажность — 10% при температуре 40°C ;

— пониженное атмосферное давление и резкие изменения этого давления (бароудар);

— дождь, град, воздействие которых может привести к осложнениям на различных этапах эксплуатации конструкции ЛА;

— иней, нарастание ледяной корки на поверхности ЛА, роса, соляные брызги и морской туман;

— атмосферная пыль и песок.

Климатические испытания проводят как для определения свойств материалов (коррозии, влагонасыщения, адгезионной прочности наледи и т.д.), так и для определения функциональных особенностей эксплуатации источников и преобразователей энергии, исполнительных органов, датчиков и элементов автоматики, измерительных и электронных приборов, электрожгутов и т.д. в сложных условиях воздействия климатических факторов.

Воспроизведение одного из перечисленных климатических факторов или их комбинаций осуществляется с помощью специальных камер (табл. 2.9).

Принципиальные возможности нагревательных, охлаждающих и вакуумных установок были рассмотрены в предыдущих разделах.

На рис. 2.108 показана принципиальная схема стенда для проведения испытаний различных объектов на воздействие резкого изменения окружающего (статического) давления — *камеры бароудара*.

Процесс испытаний на таком стенде осуществляется следующим образом. Камера 1 вакуумируется за счет использования вакуумной системы 8. При достижении заданного разрежения в этой камере, а следовательно, заданного перепада давлений между камерой 1 и рабочей камерой 4, что фиксируется измерительной системой 3, срабатывает

система 2 разрыва мембраны 7. В момент разрыва мембраны происходит резкое изменение давления в рабочей камере 4 за счет истечения газа из этой камеры в камеру 1.

Т а б л и ц а 2.9

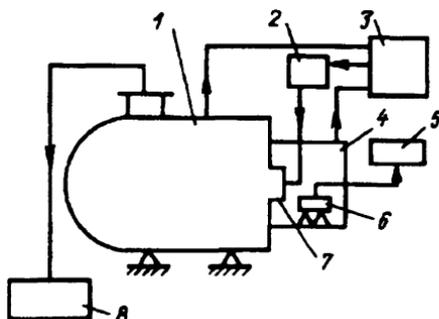
**ТИПЫ СТЕНДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

Вид стенда (камеры)	Воспроизводимый фактор	Вид стенда (камеры)	Воспроизводимый фактор
Камера тепла Термокамера	Тепло	Камера тепла и влаги	Тепло и повышенная влажность
Термобарокамера	Тепло и холод	Камера холода и влаги	Холод и влажность
Барокамера	Тепло, вакуум, холод	Камера пыли и песка	Пыль, песок
Камера бароудара	Вакуум	Камера солнечной радиации	Солнечная радиация
	Вакуум	Камера морского тумана	Соляной туман
		Камера дождя	Дождь

Для обеспечения максимально возможного темпа изменения давления в рабочей камере 4 необходимо, во-первых, чтобы объемы вакуумной камеры 1 и рабочей 4 различались как можно больше; во-вторых, материал мембраны 7 должен практически мгновенно разрушаться; в-третьих, площадь отверстия, где установлена мембрана 7, должна быть такой, чтобы при выбранном перепаде давлений между камерами 1 и 4 устанавливался критический режим истечения в период, когда происходит выравнивание давлений. Быстродействие системы измерения параметров испытуемого изделия и контроля давлений

Рис. 2.108. Схема стенда для проведения испытаний на воздействия резкого изменения давления:

- 1 - вакуумная камера; 2 - система управления разрывом мембраны;
- 3 - измерительная система; 4 - камера повышенного давления; 5 - система контроля характеристик испытуемого объекта;
- 6 - испытуемый объект;
- 7 - мембрана; 8 - вакуумные насосы



в камерах 1 и 4 должно быть больше времени, за которое изменяется давление в камере 4.

Рассмотрим устройство камеры тепла и влаги.

Для увлажнения воздуха применяют:

- 1) испарение воды в воздух, омывающий поверхность испарения;
- 2) подмешивание водяного пара.

Увлажнение воздуха испарением воды (рис. 2.109) происходит под влиянием разности парциальных давлений: пара над поверхностью воды и пара в увлажняемом воздухе. Через форсунки 2 вода попадает в поток сухого воздуха. Чтобы предотвратить вынос капель воды, с двух сторон увлажнительной камеры устанавливаются каплеотделители 1 и 3.

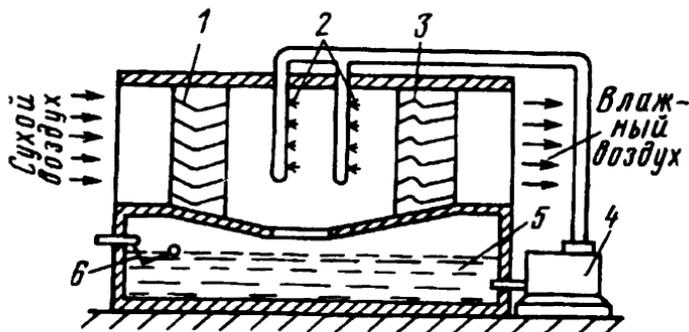


Рис. 2.109. Схема установки для увлажнения воздуха путем испарения воды

В результате резких изменений направления движения воздуха в каплеотделителе брызги воды попадают на поверхность его лопастей и стекают в поддон 5. Вода подается в поддон с помощью шарикового клапана 6, а циркуляцию воды по трубопроводам обеспечивает насос 4.

Для осушения воздуха используются:

- 1) охлаждение с конденсацией и вымораживанием влаги;
- 2) водные растворы некоторых солей;
- 3) твердые поглотители.

Установка для осушения воздуха охлаждением (рис. 2.110) состоит из двух камер: нижней и верхней. В нижней камере установлен испаритель 3. Воздух поступает в нижнюю камеру и, омывая поверхность змеевика, осушается и охлаждается. Затем он попадает в верхнюю камеру, омывает поверхность конденсатора 1 холодильной машины и нагревается до заданного уровня. Хладагент подается в испаритель 3 через регулирующий вентиль 2 и отсасывается компрессором 4. Влага, выпавшая на поверхность испарителя, стекает в поддон 5.

Камеры пыли и песка подразделяются на два вида: стенды для изучения статического воздействия пыли и стенды для изучения динамического воздействия пыли и песка на элементы конструкции ЛА, где скорости газа с пылевыми примесями достигают 25 м/с.

Стенд для изучения статического воздействия пыли (рис. 2.111) представляет собой камеру 1, разделенную на две половины перегородкой 2. В правой части камеры устанавливается изделие 3, а в левой вентилятор 4 создает облако пыли с заданными размерами частиц. Пыль через щель в перегородке попадает в полость, где находится объект испытаний, и оседает на его поверхностях. Обычно такие камеры используют для проведения ресурсных испытаний.

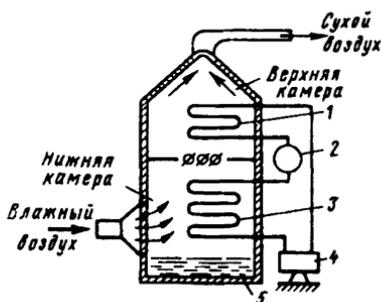


Рис. 2.110. Схема установки для осушения воздуха охлаждением

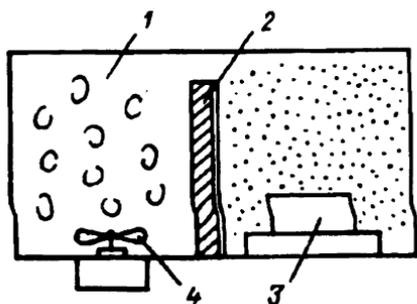


Рис. 2.111. Схема стенда для испытаний на статическое воздействие пыли

Стенд для испытаний на динамические воздействия пыли и песка представляет собой по существу дозвуковую аэродинамическую трубу (рис. 2.112), где в газовом потоке находятся частицы пыли или песка. Особенностью проведения таких испытаний является обеспечение равномерного распределения частиц пыли или песка с заданной скоростью полета в месте расположения испытуемого объекта.

Принципиальная схема возможной установки для исследования адгезионной прочности наледи показана на рис. 2.113. Захлаживание и термостатирование образца 8 проводятся в термостате 5 с пористой теплоизоляцией в парах азота при атмосферном давлении. Азот подается в термостат из

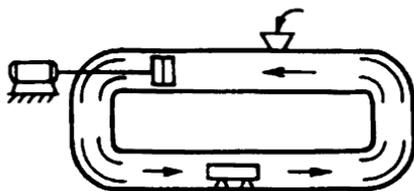


Рис. 2.112. Схема стенда для испытаний на динамическое воздействие пыли

сосуда Дьюара 15 методом вытеснения. Избыточное давление создается с помощью электронагревателя 7. Испарение жидкого азота происходит в соединительной магистрали 13. Температура в термостате регулируется подогревом паров электронагревателем 10 перед поступлением их в термостат.

С целью уменьшения паразитных теплопритоков образец устанавливается в термостате на двух изоляторах.

Крепление тяги 3 к внешней поверхности наледи осуществляется с помощью шайбы 6, обладающей высокой теплопроводностью и достаточной жесткостью. Для увеличения адгезионной прочности крепления технологической шайбы контакт можно осуществлять через фетровую приставку 7.

Температура в камере регулируется изменением напряжения питания электронагревателя 10.

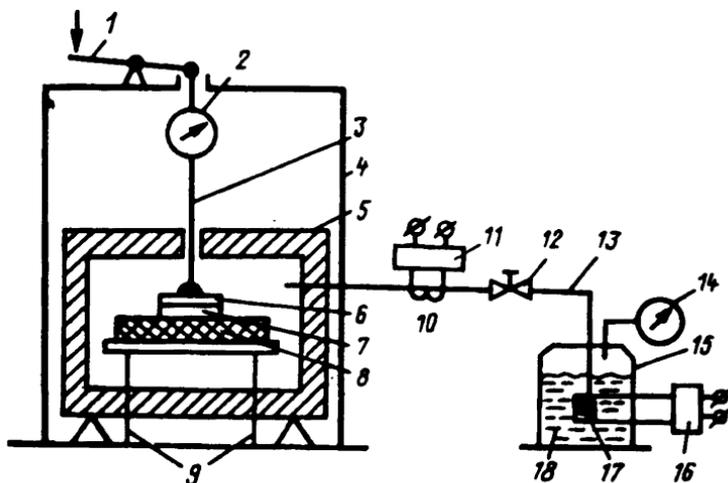


Рис. 2.113. Схема установки для исследования адгезионной прочности: 1 - рычаг; 2 - динамометр; 3 - тяга; 4 - корпус; 5 - термостат; 6 - шайба; 7 - фетровая приставка; 8 - испытуемый образец; 9 - стойки крепления; 10 - электронагреватель; 11 - источник электропитания; 12 - кран; 13 - соединительная магистраль; 14 - манометр; 15 - сосуд Дьюара; 16 - источник электропитания; 17 - электронагреватель; 18 - азот

В камере дождя (рис. 2.114) для получения капель требуемого размера используется набор полых игл 2. Частота падения капель 3 обеспечивается за счет воздействия звукового генератора 5 на поверхность воды 1.

В процессе испытания задается программа изменения статического давления и температуры окружающей среды, а также время начала и конца воздействия атмосферных осадков.

При воздействии атмосферных осадков дождевальная панель устанавливается над испытуемым элементом, и в нее через коллектор 4 подается вода. Звуковым генератором задают необходимую частоту падения капель.

Качество имитатора морского тумана характеризуется степенью приближения:

- 1) соляного состава аэрозоля к соляному составу морского тумана;
- 2) концентрации солей в аэрозоле к концентрации солей в морской воде.

Анализ большого числа проб позволяет сделать вывод, что соляной состав океанов и морей примерно одинаков, но концентрация солей различна. Концентрация солей в морской воде часто определяется содержанием хлора, а не содержанием соли. Среднее содержание хлора в 1 кг морской воды равно 19,381 г. В табл. 2.10 приведены составные части воды океана с содержанием хлора 19,00 г.

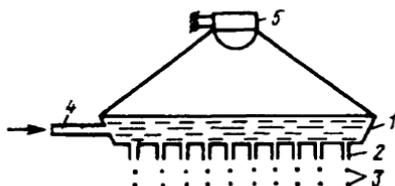


Рис. 2.114. Принципиальная схема дождевальной панели

Т а б л и ц а 2.10

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ ОКЕАНА

Элемент	Количество частей на миллион частей воды	Элемент	Количество частей на миллион частей воды
Хлор	19 000	Стронций	13,3
Натрий	10 556	Бор	4,6
Магний	1272	Кремний	0,02-4
Кальций	400	Азот	0,01-0,7
Сера	884	Фтор	1,3
Калий	380	Йод	0,5
Углерод	27,5	Рубидий	0,2

В качестве одного из способов получения тумана можно использовать распыление раствора солей сжатым воздухом через центробежные форсунки (рис. 2.115). До эксперимента соли взвешиваются и растворяются в дистиллированной воде. Растворы обычно хранятся в резервуаре из органического стекла.

Установки морского тумана позволяют получать туман со следующими параметрами:

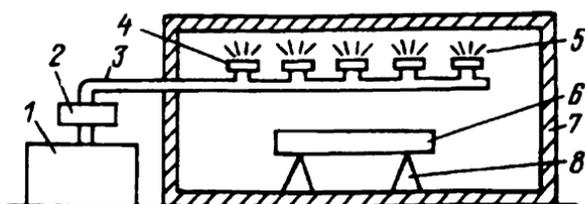


Рис. 2.115. Схема установки для испытаний на воздействие морского тумана:
1 - емкость с рабочей жидкостью; 2 - дозатор; 3 - трубопровод;
4 - форсунки; 5 - распыленный раствор; 6 - испытуемый образец;
7 - корпус; 8 - стойки

- 1) 90% всех капель имеют размер 0,001 — 0,007 мм;
- 2) в 1 см³ содержится $3 \cdot 10^5$ капель;
- 3) водность тумана составляет 2 — 3 г/м³.

Дисперсность морского тумана определяют методом микрофотографирования.

2.5.

Испытания на воздействие радиационных факторов

2.5.1.

Ионизирующие излучения

В процессе эксплуатации КЛА подвергаются воздействиям ионизирующих излучений. Ионизирующие излучения могут вызвать необратимые изменения свойств материалов КЛА и особенно электрических параметров приборов и изделий, содержащих электронные блоки.

По составу частиц ионизирующие излучения подразделяются на следующие основные виды: гамма-излучение (γ), нейтронное (n), электронное (e), протонное (p).

Кроме этих видов излучения, заметное воздействие на материалы и изделия могут оказывать также альфа-частицы (α), осколки деления F_p и другие частицы, возникающие в ядерном реакторе КЛА, однако

тяжелые частицы обладают очень малой проникающей способностью и на изделия действовать не будут. Действием других частиц (нейтринов, мезонов и др.) можно практически пренебречь из-за его крайне незначительного уровня.

Основными характеристиками ионизирующих излучений (табл. 2.11) являются энергия частиц, выражаемая в электронвольтах (эВ), и плотность потока частиц, выражаемая числом частиц, проходящих через единицу площади в единицу времени. В настоящее время как у нас, так и за рубежом в качестве меры плотности потока частиц ϕ принято использовать число частиц, проходящих через площадку в 1 см^2 за 1 с .

В реальных условиях ионизирующие излучения имеют обычно сложное распределение частиц по энергиям — энергетический спектр. Уровень воздействия проникающей радиации зависит от времени воздействия излучения с данной плотностью потока на вещество и выражается числом частиц, прошедших через площадку в 1 см^2 за время облучения интегральным потоком Φ .

Другими характеристиками воздействия на вещество излучения со сложным энергетическим спектром являются доза D и мощность дозы P . Доза излучения — это количество энергии, переданное веществу излучением в расчете на единицу массы; мощность дозы — значение дозы, отнесенное к единице времени.

Действие ионизирующих излучений на материалы и изделия можно разделить на импульсное (протекающее очень короткое время) и непрерывное (длительное).

Между влиянием импульсной радиации и влиянием непрерывной радиации, действующей на объекты с ядерными энергетическими установками и космические объекты, существует большое различие.

Воздействие непрерывной проникающей радиации особенно сильно сказывается на электронике КЛА. Оно приводит к постепенному необратимому изменению электрических параметров приборов и изделий на борту КЛА, вызываемому в основном смещениями атомов, т.е. нарушениями в структуре материала, а также незначительным изменением химического состава (активацией).

Импульсная радиация, действующая короткое время ($10^{-7} — 10^{-3} \text{ с}$), наряду с необратимым изменением электрических параметров изделий электронной техники, создает очень большую плотность ионизации как в самих облучаемых изделиях, так и вокруг изделий (ионизация воздуха). Это, как правило, приводит к обратимому изменению электрических параметров изделий.

Поэтому при исследовании необратимых изменений электрических параметров материалов и изделий электронной техники изучается их зависимость от интегрального потока частиц или дозы облучения, а при исследовании обратимых изменений — их зависимость от плотности потока или мощности дозы.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Характеристика	Определяющее соотношение	Примечания
Кинетическая энергия радиоактивного излучения E , эВ	$E = qU$	q — заряд частиц, Кл; U — разность потенциалов, В
Плотность потока частиц или квантов φ , $\text{с}^{-1} \text{ м}^{-2}$	$\varphi = \Phi/S$	S — площадь поверхности, м^2
Поток радиоактивных частиц или квантов Φ , с^{-1}	$\Phi = n/t$	n — число частиц или квантов; t — время, с
Поглощенная доза радиоактивного излучения D , Гр	$D = E/m$	m — масса облучаемого вещества, кг
Мощность поглощенной дозы радиоактивного излучения P , Гр/с	$P = \Delta D/\Delta t$	ΔD — увеличение поглощенной дозы за время Δt
Экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучений (экспозиция) D_3 , Кл/кг	$D_3 = Q/m$	Q — сумма электрических зарядов ионов, имеющих одинаковый знак и возникающих в воздухе, когда все электроны, освобожденные с помощью квантов рентгеновского и гамма-излучений в элементарном объеме воздуха, полностью тормозятся, Кл; m — масса элемента объема воздуха, кг
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений P_3 , А/кг	$P_3 = \Delta D_3/\Delta t$	ΔD_3 — увеличение экспозиционной дозы за время Δt

Источниками космических излучений в околоземном пространстве являются:

— потоки космических лучей, включающие в себя первичное космическое (галактическое) излучение и космическое излучение Солнца, возникающее при интенсивных хромосферных вспышках на Солнце;

— радиационные пояса Земли (естественные и искусственные), расположенные на расстояниях от нескольких сот до нескольких десятков тысяч километров от поверхности Земли.

Первичные галактические лучи, движущиеся в межзвездном пространстве, представляют собой ядра различных химических элементов. В насто-

ящее время состав частиц галактического излучения хорошо изучен. Основную часть излучения составляют протоны (около 85%), около 15% — ядра гелия (α -частицы) и совсем небольшое число ядер более тяжелых элементов. Частицы галактических лучей обладают очень высокой энергией — от 10^8 — 10^9 эВ до 10^{19} — 10^{20} эВ, но плотность потока этих лучей очень мала — 1 — $2 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, что будет составлять дозу облучения на объекте за год не более 10^{-2} — 10^{-1} Дж/кг (1 — 10 рад).

Солнечное космическое излучение наблюдается только в период солнечной активности (вспышки) и продолжается короткое время (до 4 суток). Оно состоит в основном из протонов (85%) и небольшого количества α -частиц и ядер легких элементов и имеет энергию до 10^8 эВ. Плотность потока протонов для больших вспышек равна примерно $10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. За время солнечной вспышки, длительность которой составляет одни сутки, поток протонов с энергией более 30 МэВ достигает величины 10^{10} с^{-1} , а поток протонов с энергией более 5 МэВ — величины 10^{11} с^{-1} . Максимально возможные годовые дозы для протонов солнечных космических излучений могут составлять величину порядка 10 — 10^2 Дж/кг (10^3 — 10^4 рад) на поверхности объекта и 1 — 10 Дж/кг (10^2 — 10^3 рад) за слоем защиты 1 г/см^2 .

Радиационные пояса Земли делятся на естественные и искусственные. Искусственные радиационные пояса образуются в результате ядерных взрывов в верхних слоях атмосферы и имеют определенный период существования.

Естественный радиационный пояс Земли, в свою очередь, делится на внутренний и внешний. Внутренний радиационный пояс состоит главным образом из протонов с энергией примерно 1 — 700 МэВ. Расположен этот пояс на высоте 600 — 1500 км от поверхности Земли. Внешний радиационный пояс состоит из электронов с энергией примерно $0,1$ — 5 МэВ, при этом большая часть электронов имеет энергию порядка сотен килоэлектронвольт.

Состав, плотности потоков и энергетические спектры частиц в естественных радиационных поясах Земли зависят от временных вариаций, связанных в основном с процессами, происходящими на Солнце, при этом внутренний радиационный пояс мало подвержен временным изменениям, а внешний, наоборот, подвержен им очень сильно.

При определении уровня воздействия космических ионизирующих излучений на радиоэлектронное оборудование КЛА необходимо также учитывать степень его защищенности (обшивка аппарата, наличие экранов и т.д.), поскольку защита может не только служить для ослабления потоков частиц, но и являться генератором вторичных излучений, особенно при воздействии протонов с высокой энергией (более 50 МэВ).

В табл. 2.12 приведены ориентировочные данные о максимально

Т а б л и ц а 2.12

**ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ
(ДЛЯ ОРБИТ $H = 100 + 500$ КМ)**

Радиационный пояс	Тип излучения	Энергия частиц, МэВ	Годовая экспозиционная доза излучения			
			Поверхностный слой		Слой в 1 г/см ²	
			рад/год	Дж/(кг · год)	рад/год	Дж/(кг · год)
Внутренний	Протоны	0,001 - 700	$\approx 10^{10}$	10^8	10^5	10^3
	Электроны	< 0,02 - 1	$\approx 10^{12}$	10^{10}	0	0
	Тормозное излучение	< 0,02 - 1	$\approx 10^5$	10^3	$10^5 - 10^6$	$10^3 - 10^4$
Внешний	Электроны	0,02 - 5	$10^{11} - 10^{13}$	$10^9 - 10^{11}$	10^3	10
	Тормозное излучение	0,02 - 5	$10^5 - 10^7$	$10^3 - 10^5$	$10^4 - 10^6$	$10^2 - 10^4$

Таблица 2.13

**ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КЛА И КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Характер радиационной обстановки	Тип излучения	Обозначения	Энергия (спектр), МэВ	Поток частиц, с ⁻¹	Плотность потока частиц, с ⁻¹ ·см ⁻²	Экспозиционная доза		Мощность экспозиционной дозы	
						Р	2,58 Кл/кг	Р/с	2,58 А/кг
Импульсное облучение	Нейтроны	n	0 — 14	10 ¹¹ — 10 ¹⁵	10 ¹⁷ — 10 ²¹	—	—	—	—
	γ-кванты	γ	0,1 — 10	—	—	10 ⁻¹ — 10 ⁶	10 ⁻⁵ — 10 ²	10 ² — 10 ¹²	10 ⁻² — 10 ⁸
Излучение ядерных энергетических установок	Нейтроны	n	0 — 14	10 ¹¹ — 10 ¹⁵	10 ³ — 10 ⁸	—	—	—	—
	γ-кванты	γ	0,1 — 10	—	—	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁻⁶ — 10	10 ⁻¹⁰ — 10 ⁻³
Излучение естественных и искусственных радиационных поясов Земли	Протоны	p	0,001 — 700	—	До 10 ⁶	10 ^{5x}	10 ^{5x}	0,01 — 0,1 ^x	≈ 10 ⁻⁴ — 10 ⁻³
	Электроны	e	0,02 — 5	—	До 10 ⁹	10 ^{5x}	10 ⁵ — 10 ^{6x}	1 — 10 ^x	≈ 10 ⁻² — 10 ⁻¹

Примечание. Экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы даны в Дж/кг (рад) и Вт/кг (рад/с) по поглощению в NaI за слоем защиты 1 г/см².

возможных годовых экспозиционных дозах ионизирующих излучений (по поглощению в NaI) внутреннего и внешнего радиационных поясов Земли. Из таблицы видно, что электроны естественных радиационных поясов Земли будут вносить незначительный вклад в общую экспозиционную дозу за слоем защиты 1 г/см².

Искусственный радиационный пояс в основном состоит из электронов, источником которых является β -распад осколков деления ядер, при этом каждый осколок деления в течение нескольких секунд испускает примерно один электрон, а в течение нескольких сотен секунд — три электрона.

Таким образом, радиационная обстановка на борту околоземных космических объектов будет определяться в основном протонами внутреннего радиационного пояса и электронами искусственного радиационного пояса Земли, характеристики которых приведены в сводной табл. 2.13.

2.5.2.

Источники радиации, применяемые при экспериментальных исследованиях

Для исследования радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры в качестве источников нейтронного, электронного, протонного и γ -излучений широкое применение получили различные исследовательские ядерные реакторы импульсного и непрерывного действия, импульсные генераторы нейтронов, импульсные реакторы, импульсные рентгеновские установки, ускорители электронов и γ -установки непрерывного действия.

Источники нейтронов. Нейтроны образуются только в результате ядерных реакций. Первыми источниками нейтронов являлись радиево-бериллиевые источники, в которых образование нейтронов происходило в результате ядерной реакции взаимодействия ядер бериллия с α -частицами радия с образованием ядер углерода и нейтронов $\text{Be}^9(d, n)\text{C}^{12}$.

В качестве источников нейтронов можно использовать также ядерные реакции, происходящие при бомбардировке некоторых материалов (дейтерий, бериллий, литий) заряженными частицами (дейтронами, α -частицами и др.) на ускорителях заряженных частиц, например $\text{H}^2(d, n)\text{He}^3$, $\text{Li}^7(d, n)\text{Be}^8$ и т.д. Однако эти источники нейтронов моноэнергетичны и имеют относительно малый выход нейтронов на полный телесный угол: от 10^7 — 10^8 с⁻¹ для радиево-бериллиевых источников до 10^{12} — 10^{13} с⁻¹ при использовании ускорителя.

Наиболее мощными источниками нейтронов являются исследовательские ядерные реакторы на тепловых, промежуточных и быстрых нейтронах.

По принципу работы все реакторы делятся на импульсные (развивающие большую мощность при очень коротком времени функционирования, порядка $10^{-5} - 10^{-2}$ с) и статические (длительного действия).

Для испытаний и исследований материалов и изделий электронной техники на воздействие импульсной радиации ядерного взрыва и непрерывное воздействие радиации ядерных энергетических установок широко используются исследовательские ядерные реакторы как импульсного, так и статического действия. В последние годы для проведения испытаний и исследования материалов и изделий электронной техники на импульсное воздействие радиации кроме импульсных реакторов широко применяются импульсные высокоэнергетические электронные ускорители — генераторы коротких импульсов жесткого рентгеновского излучения высокой интенсивности.

В табл. 2.14 и 2.15 приведены основные характеристики исследовательских импульсных и статических реакторов США и Англии.

Типовым статическим реактором для исследовательских целей является водо-водяной реактор бассейного типа на тепловых нейтронах с мощностью 1 — 10 МВт и максимальной плотностью потока тепловых нейтронов $10^{13} - 10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Замедлителем и теплоносителем в таком реакторе является вода, топливом — обогащенный уран-235. Такие исследовательские реакторы отличаются от других реакторов на тепловых нейтронах сравнительно большим отношением потока быстрых к потоку тепловых нейтронов. Характерный спектр быстрых нейтронов для исследовательского водо-водяного реактора приведен на рис. 2.116.

Спектр нейтронов в реакторе, как видно из рисунка, вследствие рассеяния и поглощения нейтронов в конструкционных материалах активной зоны заметно отличается от спектра нейтронов деления U^{235} .

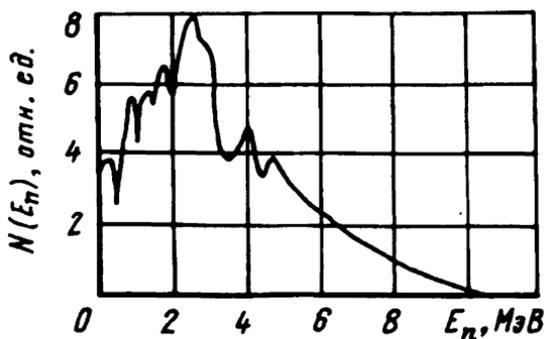


Рис. 2.116. Характерный спектр быстрых нейтронов для исследовательского водо-водяного реактора

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Реактор	Поток нейтронов за импульс, с ⁻¹	Максимальная мощность дозы γ -излучения		Длительность импульса на половине амплитуды, мкс
		Р/с	2,58 А/кг	
«Годива-1»	$>2,5 \cdot 10^{13}$	$> 10^7$	$> 10^3$	50
«Годива-2»	$>2,5 \cdot 10^{13}$	$> 10^7$	$> 10^3$	40—50
«Трига»	10^{14}	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^2$	10^4
ФБП	10^{14}	—	—	40
«Сандиа»	10^{12}	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^4$	50
«Молли-1»	$2 \cdot 10^{14}$	—	—	50
«Кукла»	$1,4 \cdot 10^{14}$	$10^9 — 10^{10}$	$10^5 — 10^6$	60
ОРН-1	—	$\approx 10^8$	$\approx 10^4$	—
ГЕПР	$7 \cdot 10^{12}$	$7,14 \cdot 10^6$	$7,14 \cdot 10^6$	38
АППА	$\approx 10^{15}$	—	—	<40

Особенностью испытаний и исследования материалов и изделий электронной техники на воздействие ионизирующих излучений является необходимость применения дистанционной измерительной аппаратуры для измерения временных и остаточных изменений их электрофизических параметров как при импульсном, так и непрерывном воздействии радиации. В каналах ядерных реакторов на изделия и материалы кроме ионизирующих излучений одновременно могут воздействовать температура, влажность, ионизирующая окружающая среда. Чтобы исключить влияние этих побочных факторов, применяют различные контейнеры (пеналы), охлаждение изделий с помощью обдува, заливку открытых контактов изделий и т.д. Поэтому экспериментальные каналы реакторов, предназначенные для проведения испытаний и исследования материалов и изделий электронной техники на воздействие радиации, должны обеспечивать:

— дистанционные измерения параметров изделий в канале работающего реактора, а также возможность помещения измерительной аппаратуры на входе канала, быструю смену аппаратуры и ее регулировку;

— быстрое помещение контейнеров с объектом облучения и измерительными линиями внутрь канала и перемещение их в канале с помощью дистанционных ручных или автоматизированных механических приспособлений, а также возможность быстрой смены контейнеров;

— охлаждение объекта облучения в канале реактора и проведение низкотемпературных исследований;

— установку сменных фильтров и коллиматоров в канале (для уменьшения γ -фона и фильтрации тепловых нейтронов).

Т а б л и ц а 2.15

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Реактор	Мощность реактора, МВт	Максимальная плотность потока нейтронов, $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	Максимальная мощность дозы γ -излучения	
			10^3 Р/с	2,58 А/кг
ФНП (канал Д)	1	2,7 · 10 ¹² , тепловые	1,2	0,12
		2,5 · 10 ¹⁰ , 0,5 МэВ		
		7,2 · 10 ⁹ , 2,9 МэВ		
		2,3 · 10 ⁹ , 5,3 МэВ		
		3,9 · 10 ⁸ , 8,6 МэВ		
СП-5	2	2,4 · 10 ¹² , тепловые	0,75	0,075
		5,4 · 10 ⁹ , 1 МэВ		
		10 ⁸ , 2,5 МэВ		
МТР	40	2 · 10 ¹⁴ , тепловые	10 ²	10
		1,3 · 10 ¹² , 1 МэВ		
БЕПО	6	1,5 · 10 ¹² , тепловые	—	—
ДИДО	10	8 · 10 ¹³ , тепловые	—	—

Требования к испытательным каналам статических реакторов в равной мере относятся и к импульсным источникам проникающей радиации. Кроме того, при работе на импульсных источниках радиации появляются дополнительные трудности, связанные с дистанционными измерениями и автоматической регистрацией кратковременных изменений электрических параметров изделий электронной техники в момент действия импульса радиации и регистрацией остаточных изменений этих параметров изделий после воздействия импульса радиации. Необходимы также дополнительные меры для защиты изделий электронной техники от электромагнитных наводок.

Типовым импульсным реактором для исследовательских целей является реактор «Годива», представляющий собой критическую сборку из обогащенного урана U^{235} с максимальной мощностью 1 кВт за импульс. Для проведения экспериментальных работ реактор имеет центральный канал диаметром 2,5 см, идущий внутрь установки. Энергетический спектр нейтронов в нем приведен в табл. 2.16 и на рис. 2.117. Для сравнения в этой же таблице и на рисунке (штриховая линия) приведен энергетический спектр нейтронов деления U^{235} .

При испытаниях материалов и изделий электронной техники в каналах исследовательских ядерных реакторов или в зоне облучения других источников на них могут воздействовать потоки нейтронов и γ -квантов со спектрами излучений и плотностью потока, существенно отличающимися от соответствующих характеристик радиационной обстановки в условиях эксплуатации. Особенно существенно могут

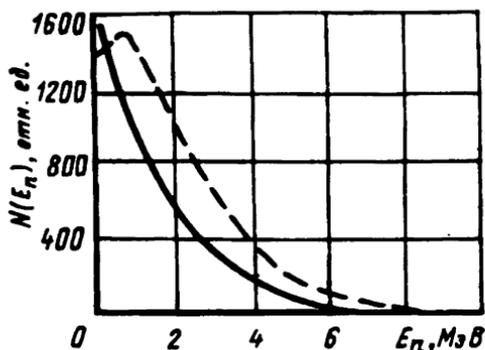


Рис. 2.117. Энергетический спектр нейтронов

различаться спектры нейтронов в низкочастотной области (до 0,1 МэВ). Высокоэнергетические части спектров нейтронов обычно не столь значительно отличаются друг от друга. Поскольку вклад доли нейтронов с низкой энергией в радиационное повреждение материалов обычно невелик по сравнению с воздействием быстрых нейтронов, на практике при таких испытаниях принято уровни воздействия нейтро-

нов от различных источников оценивать по потоку быстрых нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ.

В тех случаях, когда требуется более высокая точность оценки и спектр нейтронов при испытаниях значительно отличается от требуемого, вводят поправку на несоответствие энергетических спектров нейтронов — коэффициент эффективности воздействия — путем умножения на этот коэффициент потока быстрых нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ, полученной при испытаниях.

Т а б л и ц а 2.16

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ПРИ ДЕЛЕНИИ ЯДЕР
В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА «ГОДИВА»**

Диапазон энергии, МэВ	Доля нейтронов, %	
	Спектр деления	Спектр в канале реактора
0 — 0,4	10	21
0,4 — 1,4	34	41
1,4	56	38

Уровни воздействия γ -квантов при испытаниях материалов и изделий электронной техники с достаточной для практики точностью принято оценивать по экспозиционной или поглощенной дозе облучения (по NaI), поскольку средние энергии γ -излучения различных реакторов не столь существенно отличаются и составляют величину около 1 МэВ. Но при испытаниях изделий электронной техники поток быстрых нейтронов и экспозиционная доза γ -квантов испытательной установки могут отличаться от требуемых. В этих случаях, чтобы учесть вклад экспозиционной дозы γ -излучения в изменение параметров материалов и изделий электронной техники, проводят дополнительное облучение на γ -установке.

Ускорители заряженных частиц. Ускорители — это устройства, в которых используется эффект ускорения заряженных частиц под действием электрического поля; при этом энергию в 1 эВ приобретает частица с единичным электрическим зарядом (электрон, протон) при прохождении участка поля с разностью потенциалов $U = 1$ В. Кинетическая энергия, сообщаемая заряженной частице электрическим полем с разностью потенциалов U :

$$E = eU,$$

где E и e — энергия и заряд частицы.

На практике пользуются единицами энергии заряженных частиц: 1 кэВ = 10^3 эВ, 1 МэВ = 10^6 эВ.

Основными характеристиками ускорителя являются энергия ускоренных частиц и ток пучка частиц. Например, при токе 1 мА поток однопозитронных частиц составит $6,24 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

Первыми, наиболее простыми типами ускорителей заряженных частиц были электростатические генераторы, основанные на использовании метода прямого ускорения заряженных частиц в электрическом поле. Некоторые конструкции электростатических ускорителей (вакуумные ускорительные трубки, генераторы Кокрофта — Уолтона, генераторы Ван-де-Граафа) широко используются в настоящее время. Недостатком электростатических ускорителей является трудность получения заряженных частиц с высокими энергиями (выше нескольких мегаэлектронвольт). Дальнейшее развитие и совершенствование техники ускорения заряженных частиц шло по пути использования высокочастотного электрического поля. Ускорители, основанные на ускорении заряженных частиц с помощью высокочастотного поля, в свою очередь подразделяются на линейные и циклические.

Кроме того, ускорители подразделяются по виду орбиты частиц, ускоряющему электрическому полю, приложенному магнитному полю (для цилиндрических ускорителей).

Типы ускорителей, которые можно использовать для проведения испытаний и исследований материалов и изделий электронной техники, указаны в табл. 2.17.

В табл. 2.18 и 2.19 приведены характеристики ускорителей, которые можно использовать в качестве источников электронов и протонов для исследований радиационных эффектов в материалах и изделиях.

В зависимости от типа ускорителя пучок заряженных частиц, выходящих из него, может быть непрерывным, импульсным и состоящим из одного или большего числа сгустков, следующих один за другим с большой частотой. Непрерывные пучки дают генераторы Ван-де-Граафа и высоковольтные ускорительные трубки. Источниками импульсных пучков служат импульсные ускоряющие трубки и индукционные ускорители. В резонансных и циклических ускорителях пучки частиц состоят из сгустков, которые могут следовать непрерывно (циклотроны, микротроны непрерывного действия) или импульсами (линейные ускорители, импульсные микротроны).

Т а б л и ц а 2.17

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ УСКОРИТЕЛЕЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Тип ускорителя	Ускоряемые частицы	Вид орбиты	Магнитное поле во времени	Частота ускоряющего поля	Ускорение	Средний ток ускоренных частиц, А	Максимальная энергия, МэВ
Высоковольтные ускорители	Любые частицы	Прямолинейная	—	—	Непрерывное	10^{-3}	≈ 40
Электронный линейный ускоритель	Электроны	—	—	Постоянная	Импульсное	10^{-3}	$\approx 5 \cdot 10^4$
Протонный линейный ускоритель	Протоны, тяжелые частицы	—	—	—	—	10^{-6}	$< 10^3$
Циклотрон	То же	Спиральная	Постоянное	—	Непрерывное	10^{-3}	≈ 25
Изохронный циклотрон	—	—	—	—	—	10^{-3}	$\approx 10^2$
Бетатрон	Электроны	Круговая	Нарастающее	—	Импульсное	10^{-6}	300
Микротрон	—	Спиральная	Постоянное	Постоянная	—	10^{-3}	≈ 100
Синхроциклотрон	Протоны, тяжелые частицы	Спиральная	Постоянное	Модулированная	Импульсное	10^{-6}	$\approx 10^3$
Синхротрон (слабая фокусировка)	Электроны	Круговая	Нарастающее	Постоянная	—	10^{-7}	10^3
Синхрофазотрон (слабая фокусировка)	Протоны	—	—	Нарастающая	—	10^{-7}	10^4
Ускорители с сильной фокусировкой	—	—	—	Нарастающая, затем постоянная	—	10^{-7}	10^6
То же	Электроны	—	—	Постоянная	—	10^{-7}	10^4

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Источник энергии	Энергия, МэВ	Диапазон тока в пучке, А
Генератор Ван-де-Граафа	1 — 6	$0 — 4 \cdot 10^{-3}$
Генератор в г. Сакле, Франция	5	—
Бетатрон	6 — 30	$0 — 10^{-6}$ (выведенный из камеры)
Ускоритель фирмы «Дже- нерал Электрик», США	30	—
Линейный ускоритель	3 — 25	$0 — 3 \cdot 10^{-4}$
Ускоритель Массачусет- ского технологического института, США	18	—
Микротрон	0 — 50	$0 — 10^{-6}$
Ускоритель университет- ского колледжа, Лондон:		
модель I	5,5	$5 \cdot 10^{-7}$
модель II	30	—
Ускоритель управления военно-морских исследо- ваний, США	3,8	$10^{-8} — 10^{-9}$

Особенностью испытаний и исследований материалов и изделий электронной техники на воздействие заряженных частиц (электронов и протонов) является необходимость дистанционных измерений электрофизических параметров материалов и изделий при облучении, за исключением некоторых испытаний на воздействие электронов с энергией до 3 — 6 МэВ, при которых активации материалов не происходит.

Пучки электронов и протонов должны удовлетворять следующим основным требованиям:

— пучок должен быть выведен из камеры в воздух (за исключением пучка протонов с энергией ниже 30 МэВ, который выводится в ва-

куумную камеру с вакуумным шлюзом и со съёмным фланцем, обеспечивающим возможность облучения изделий и измерение их параметров при облучении, не нарушая вакуум в ускорительной камере);

— пучок должен иметь достаточно большие размеры (не менее 5 — 10 см по диаметру) и хорошую равномерность по сечению, при этом плотность потоков (в пучке), как правило, не должна превышать $(2-5) \cdot 10^{11} \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ для электронов и $(1-5) \cdot 10^{10} \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ для протонов (чтобы ограничить радиационный нагрев изделий).

Т а б л и ц а 2.19

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ ПРОТОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Источник энергии	Энергия, МэВ	Ток в выведенном пучке, мкА
Генератор Ван-де-Граафа	1 — 6	0 — 100
Ускоритель института атомной энергии, Англия	3,8	250
Ускоритель Калифорнийского университета, США	4	1500
Линейный ускоритель протонов	50	0 — 1
Ускоритель в г. Харуэлл, Англия	10	5
Ускоритель Калифорнийского университета, США	31,5	0,37
Циклотрон	6 — 30	0 — 100
Ускоритель Окридской национальной лаборатории, США	24	—
Ускоритель Бирмингемского университета	10	40 — 70
Синхроциклотрон	100 — 800	0 — 1
Ускоритель Калифорнийского университета, США	730	1
Ускоритель ЦЕРН, Швейцария	600	0,3
Ускоритель в г. Харуэлл, Англия	175	1

Следует отметить, что условия облучения при испытаниях материалов и изделий электронной техники на воздействие моноэнергетических пучков электронов и протонов существенно отличаются от радиационной обстановки в космических условиях, где протоны и электроны имеют сложный энергетический спектр.

Принято оценивать уровень воздействия моноэнергетических электронов и протонов на материалы и изделия электронной техники по экспозиционной дозе излучения (по NaI) с учетом поправок на собственную защиту (корпус) изделия и на соответствие повреждающей способности моноэнергетических частиц и частиц, имеющих сложный энергетический спектр в условиях космоса.

Генераторы коротких импульсов рентгеновского излучения высокой интенсивности. В настоящее время для исследования радиационных эффектов в материалах и изделиях электронной техники при импульсном воздействии радиации широко используются мощные генераторы коротких импульсов рентгеновского излучения, основой которых являются сильноточные импульсные электронные ускорители. Такие генераторы при диапазоне рабочих напряжений $(2-18) \cdot 10^6$ В и импульсных токах через рентгеновские трубки порядка $10^4 - 10^6$ А дают возможность получать импульсы рентгеновского излучения продолжительностью $5 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-8}$ с при мощности дозы вблизи выходного окна рентгеновской трубки до 10^8 А/кг (10^{12} Р/с). В США уже длительное время работают установки с диапазоном напряжений $(5-7) \cdot 10^6$ В, обеспечивающие получение импульсов рентгеновского излучения с мощностью дозы $(0,2-1) \cdot 10^6$ А/кг ($1-5) \cdot 10^9$ Р/с на расстоянии 1 м от анода рентгеновской трубки.

Мощные импульсные генераторы рентгеновского излучения включают в себя источник высокого напряжения (электростатический генератор по схеме Маркса или резонансный импульсный трансформатор со связанными контурами типа Тесла) и импульсную трубку. Для получения прямоугольных импульсов напряжения применяются формирующие линии в виде высоковольтной коаксиальной линии либо металлического цилиндра (кондуктора).

Генерирование импульса рентгеновского излучения происходит при разрядении кондуктора через газоразрядный (спусковой) промежуток на импульсную рентгеновскую трубку с автокатодом при подаче на ее запускающий электрод (катод) электрического импульса в момент, когда напряжение на кондукторе достигает установленного максимального значения. Такой генератор импульсов рентгеновского излучения позволяет получать импульсы продолжительностью менее 50 нс при мощности дозы вблизи выходного окна рентгеновской трубки $5 \cdot 10^7$ А/кг ($2 \cdot 10^{11}$ Р/с).

Объекты облучения помещаются перед выходным окном рентгеновской трубки. Параметры материалов и реакции изделий электронной

техники на воздействие импульса радиации (фототоки) измеряются дистанционно с помощью измерительных коммуникаций. Управляют установкой также дистанционно и синхронизированно с запуском измерительных приборов (осциллографов). Для дозиметрии импульсов рентгеновского излучения при работе на этих установках обычно используются ионизационные камеры. В качестве дополнительных средств дозиметрии, как правило, используются химические методы дозиметрии (например, ферросульфатный метод) или стеклянные дозиметры.

Гамма-установка. В качестве источников γ -излучения в настоящее время могут применяться радиоактивные изотопы химических элементов (либо их смесь), излучающие моноэнергетические группы γ -квантов, и ускорители электронов, излучающие тормозное γ -излучение с непрерывным спектром при торможении электронов в поле ядер мишени.

Широкое применение для различных исследований радиационных эффектов в материалах и изделиях электронной техники получили изотопные источники γ -излучения, у которых в качестве излучателей используются радиоактивные изотопы Co^{60} с периодом полураспада 5,3 года.

Гамма-кванты Co^{60} состоят из двух моноэнергетических групп с энергиями 1,173 и 1,332 МэВ, но, поскольку их выход одинаков и энергии достаточно близки, обычно считают, что энергия γ -излучения Co^{60} составляет 1,25 МэВ (т.е. среднее значение). Получают изотопы Co^{60} при облучении металлического Co^{59} в реакторе по реакции (n, γ).

Кобальтовые установки в зависимости от назначения и решаемых задач имеют различную конструкцию. Кобальтовые установки, предназначенные для исследования радиационных эффектов в материалах и изделиях электронной техники, а также для радиационно-химических исследований, имеют измерительные коммуникации, позволяющие осуществлять различные измерения в облучаемом объеме и проводить облучение в различном температурном режиме. Основными требованиями к исследовательским γ -установкам являются:

- максимально возможная мощность дозы излучения порядка 0,1 А/кг (500 Р/с);
- равномерно облучаемый рабочий объем порядка 1 — 2 л;
- степень неравномерности дозного поля в рабочем объеме не более 10 — 30%;
- возможность проведения дистанционных измерений электрических параметров при облучении.

Наиболее удачными конструкциями исследовательских γ -устано-

вок являются установки типа К, разработанные в научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова. Активность этих установок $7,4 \cdot 10^{14}$ и $2,22 \cdot 10^{15}$ расп./с (20 000 и 60 000 г-экв. радия). Кобальтовые γ -установки типа К-20000 имеют цилиндрический облучатель, внутрь которого помещаются объекты облучения. В установке К-60000 можно менять форму и размеры облучателя. Мощность дозы γ -излучения, которую можно получить в рабочем объеме 0,5 л установки К, равна 0,284 А/кг (1100 Р/с) для К-20000 и 0,645 А/кг (2500 Р/с) для К-60000.

Установки типа К с высокой активностью облучателя размещаются в бетонных защитных кабинах. При активности облучателя $7,4 \cdot 10^4$ расп./с (20000 г-экв. радия) толщина бетонных стен кабины достигает 1,5 — 2 м. Вход в кабину для установки образцов на облучение осуществляется через лабиринт.

Благодаря большому объему камеры в ней размещают подъемный механизм и вспомогательные устройства для обслуживания камеры облучения. В качестве контейнера для кобальтовых излучателей используют бетонное хранилище, из которого источники подаются в камеру для облучения по изогнутым трубкам с помощью гибких шлангов.

Объекты облучения помещаются внутрь объема облучателя, после чего с помощью подъемных механизмов источники подаются в камеру для облучения. Управляют установкой дистанционно. Наряду с центральной зоной облучения в установке можно использовать γ -излучение от облучателя с внешней стороны.

Характер изменения мощности дозы γ -излучения внутри и снаружи цилиндрической испытательной установки по среднему сечению (с внутренним диаметром 160 мм и высотой 156 мм, активность 10000 г-экв. радия) показаны на рис. 2.118.

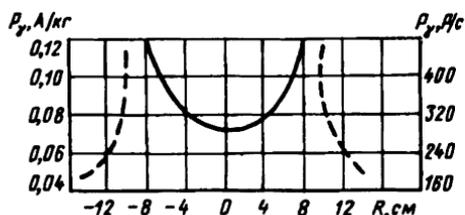


Рис. 2.118. Характер изменения мощности дозы γ -излучения внутри и снаружи цилиндрической испытательной установки по среднему сечению

Для дозиметрии γ -квантов обычно применяют химический ферросульфатный метод. Результаты измерений по этому методу хорошо воспроизводятся и дают достаточную для практики точность.

2.6. Испытания на воздействие магнитных полей

2.6.1. Электромагнитные испытания

Электромагнитное излучение Солнца вызывает фотоионизацию или фотоэлектронную эмиссию, ведущую к электрической зарядке ЛА или к утечке заряда, если аппарат заряжен до высоких потенциалов. Плотность фототока, определяемого электромагнитным излучением Солнца, для материалов на орбите Земли $i_{\phi} = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-2}$. Скапливающийся на выступающих частях ЛА электростатический заряд создает помехи в радиосвязи. Заряды, появляющиеся на ЛА вследствие фотоионизации, соответствуют пространственным потенциалам этих аппаратов, достигающим в отдельных случаях 100 В.

Стойкость к воздействию электромагнитных излучений — свойство изделий выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время и после действия электромагнитных излучений.

Агрегаты ЛА испытывают при одновременном воздействии электрической и магнитной составляющих электромагнитных излучений, которые создаются генераторами электромагнитного излучения.

При невозможности исследований на стенде аппарата в целом производится его членение. Соединительные зоны подвергаются имитационным воздействиям генераторов (тока или напряжения) и соответствующих нагрузок.

Изделия помещают в зону поля электромагнитного излучения стенда с подключением контрольно-измерительной аппаратуры для проверки функционирования изделия, находящейся за пределами рабочей зоны стенда.

Перед испытаниями и в процессе испытаний производят регистрацию воздействующих факторов — электрических и магнитных полей в рабочей зоне стенда. Размеры испытываемого изделия должны быть в несколько раз меньше соответствующих размеров рабочей зоны стенда.

При испытаниях изделий длительности фронтов импульсов имитационных режимов должны превышать соответствующие длительности эксплуатационных воздействий. В процессе испытаний изделия последовательно поворачивают по трем ортогональным осям относительно векторов электрического и магнитного полей.

В процессе и после воздействий электромагнитных излучений производят регистрацию параметров, определяющих работоспособность изделия, а также моментов времени с начала излучений.

Нормы воздействия на изделия электрической составляющей и магнитной составляющей выбираются пропорциональными значениям напряженностей электрической и магнитной составляющих и коэффициентам, учитывающим различия имитирующего и эксплуатационного режимов, погрешности измерений и возможные разбросы показателей стойкости.

После воздействия излучений проверяют работоспособность изделия при воздействии механических и климатических факторов.

Экспериментальный метод испытаний заключается в определении показателей стойкости аппаратуры на основании экспериментальных данных об изменении параметров аппаратуры в результате воздействия электромагнитных импульсов до уровней, приводящих к отказу каждого образца изделия.

Расчетный метод определения показателей стойкости аппаратуры основан на использовании экспериментальных данных об изменении параметров комплектующих изделий в зависимости от уровня электромагнитного импульса или экспериментальных зависимостей (математических моделей) электрофизических характеристик материалов комплектующих изделий от уровней электромагнитных импульсов и связи математических моделей параметров комплекса изделий с конструктивно-технологическими параметрами изделия и электрофизическими характеристиками материалов, а также связи математических моделей выходных характеристик аппаратуры с выходными параметрами изделий.

Расчетно-экспериментальный метод определения показателей стойкости к воздействию электромагнитных импульсов основан на использовании экспериментальных данных об изменении параметров комплектующих изделий в зависимости от уровней электромагнитных импульсов, связи математических моделей выходных параметров аппаратуры с параметрами изделий и на подтверждении результатов расчета отдельных подсистем экспериментом.

Испытания на соответствие требованиям по стойкости проводят на опытных образцах с целью проверки соответствия стойкости аппаратуры требованиям, указанным в нормативно-технической документации (НТД).

Испытания проводят путем воздействия на ЛА полей электромагнитных излучений с параметрами, соответствующими нормам испытаний, оговоренным в программе испытаний, с регистрацией и контролем определяющих параметров аппаратуры, указанных в НТД.

Если аппаратура в процессе и после воздействия электромагнитного импульса с характеристиками, соответствующими нормам испытаний, сохраняет свои параметры в пределах норм, установленных в НТД, и после него сохраняет работоспособность при воздействии механических нагрузок и температур с уровнями, оговоренными в программе испытаний, то стойкость аппаратуры соответствует заданным требованиям.

Испытания на стойкость к воздействию электромагнитного импульса рекомендуется проводить до проверки работоспособности при воздействии механических нагрузок и температур.

2.6.2.

Испытания на воздействие внешних магнитных полей

После исходных проверок характеристик объект помещают в зону, имеющую равномерное магнитное поле. Для этой цели может применяться специальная катушка, состоящая из двух параллельных коаксиальных плоских колец и имеющая возможность поворота вокруг горизонтальной оси.

Расстояние между средними плоскостями колец должно равняться половине среднего диаметра обмотки колец. Средний диаметр кольца должен быть не менее чем в 2,5 раза больше габаритных размеров испытуемого объекта. Корпус и узлы крепления катушки должны быть из немагнитных материалов.

Изделие подвергают воздействию постоянного и переменного магнитного полей в соответствии с реальными условиями эксплуатации.

Силу тока выбирают с таким расчетом, чтобы получить в центре катушки магнитное поле требуемой напряженности.

Напряженность магнитного поля вычисляют по формуле

$$H = \frac{1,44 I w}{D},$$

где H — напряженность магнитного поля, А/м; I — сила тока, протекающего через обмотку, А; w — число витков обмотки каждого из колец; D — средний диаметр кольца.

Объект испытывают во включенном состоянии. Испытуемый объект и катушку, создающую магнитное поле, поворачивают относительно друг друга до положения, при котором наблюдается максимальное влияние поля на изделие.

Средства измерений, используемые в процессе испытаний, должны быть удалены от магнитной катушки на расстояние, обеспечивающее независимость их показаний от магнитного поля, создаваемого катушкой.

После выключения катушки при необходимости проводят заключительные проверки характеристик объекта.

Изделие считают выдержавшим испытание; если во время и после испытания его характеристики соответствуют требованиям, установленным в технических условиях на изделие.

Метрологическое обеспечение при экспериментальных исследованиях должно давать возможность получать в исследуемой точке при каждом испытании данные:

о значениях амплитудно-временных характеристик полей электромагнитного воздействия с суммарной погрешностью не выше $\pm 10\%$ для напряженности электрического поля и не выше $\pm 10\%$ для напряженности магнитного поля.

Аттестация моделирующих установок, предназначенных для испытания, должна обеспечивать информацию об амплитудно-временных характеристиках полей электромагнитного импульса с погрешностью не выше $\pm 10\%$.

2.7.

Электрические испытания

Электрические испытания приборов и систем проводятся с целью проверки электрической прочности, сопротивления изоляции и нормального функционирования ЛА. Электрические испытания включают в себя: автономные испытания приборов, агрегатов и систем до установки на аппарат, в процессе сборки; комплексные испытания расстыкованного и состыкованного ЛА. Электрическая прочность и сопротивление изоляции проверяются на собранных блоках или системах:

- между электрическими цепями и металлическими изолированными частями приборов;
- между разъединяющимися в процессе функционирования электрическими цепями;
- между электрически не соединенными цепями.

Вначале проверяется электрическая прочность, а затем измеряется электрическое сопротивление изоляции. Объем электрических испытаний определяется нормативно-технической документацией.

2.7.1

Проверка электрической прочности изоляции

Электрической прочностью является способность электрической изоляции выдерживать действие приложенного к ней электрического напряжения. Она определяется значением

напряжения, при котором наступает пробой, — пробивным напряжением.

Электрическую прочность можно определить с помощью формулы

$$E = \frac{\alpha U_{\max}}{\delta},$$

где α — коэффициент неоднородности поля; U_{\max} — напряжение, вызывающее пробой; δ — толщина изоляции.

Пробивное напряжение зависит от шероховатости поверхности, наличия масла, влаги, пыли, гигроскопичности и т. п. Номинальное напряжение, приложенное к изоляции изделия при нормальном функционировании, меньше пробивного напряжения. Испытательное напряжение для проверки электрической прочности изоляции зависит от номинального напряжения, его мощности, режимов эксплуатации и определяется нормативно-технической документацией.

При испытаниях допускается объединять несколько электрически независимых цепей, имеющих одинаковое рабочее напряжение, в единую систему.

Испытательное напряжение рассчитывается по формуле

$$U = U + \beta U_n,$$

где U — напряжение, определяемое нормативно-технической документацией; β — коэффициент; U_n — номинальное напряжение. Испытательное напряжение должно быть синусоидальным. Практически изоляцию подвергают воздействию максимального напряжения с амплитудой

$$U_{\max} = \sqrt{2}U.$$

При пикообразном напряжении при том же действующем значении амплитуда гораздо больше.

Испытательное напряжение должно увеличиваться и уменьшаться плавно. При резком включении или отключении напряжения в исследуемой цепи, имеющей значительную индуктивность, могут возникнуть ударные перенапряжения, ударная напряженность поля в момент импульса окажется больше электрической прочности изоляции, и тогда произойдет пробой. Продолжительность изменения испытательного напряжения до U_{\max} должна быть более 10 с. Возможно ступенчатое изменение напряжения от 0 до $0,5 U_n$, затем ступенями по $(0,05 — 0,10)U_n$ повышение до максимального напряжения U_{\max} , выдержка в течение 1 мин и ступенчатое снижение напряжения.

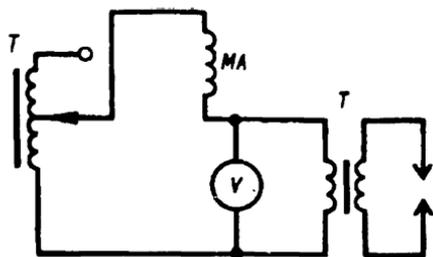


Рис. 2.119. Схема установки для проверки электрической прочности изоляции

Установки для испытаний электрической прочности изоляции обычно обладают мощностью более 500 В·А, поэтому к работе допускают только специалистов, прошедших инструктаж по технике безопасности.

Изоляцию ЛА, обладающих различной проводимостью в различных направлениях, подвергают испытанию напряжением постоянного тока.

Электрическую прочность межвитковой изоляции обмоток электрических машин проверяют на холостом ходу плавным повышением напряжения на обмотке. Изоляция должна выдерживать в течение 5 мин напряжение, в 1,5 — 2 раза превышающее рабочее напряжение. Пробой межвитковой изоляции обмотки контролируется по снижению напряжения.

Схема установки для проверки электрической прочности изоляции показана на рис. 2.119.

Испытательное напряжение во вторичной обмотке трансформатора *T* устанавливается автотрансформатором *T* по вольтметру *V*. При пробое в первичной обмотке *T* будет проходить большой ток; при этом срабатывает максимальный автомат *МА* и трансформатор отключается.

При проверке электрической прочности изделий в условиях пониженного давления испытания проводятся в барокамере при испытательном давлении.

Испытание изделий на воздействие отклонения частоты питания. На начальном этапе до испытания проверяют работу изделия при номинальной частоте питания и снимают исходные характеристики.

Увеличивают частоту питания до верхнего предельного значения и после стабилизации работы изделия проверяют требуемые характеристики.

Уменьшают частоту питания до нижнего предельного значения и после стабилизации работы изделия проверяют требуемые характеристики.

Изделие считают выдержавшим испытание, если при измененных значениях частоты питания (увеличении или уменьшении) его характеристики находятся в пределах норм, установленных в технических условиях на изделие.

Метод контроля отклонения напряжения питания от номинального значения и продолжительность переключения на резервный источник питания устанавливают в технических условиях.

Испытание изделий на воздействие отклонения напряжения питания. Устанавливают напряжение питания, равное номинальному значению, и после стабилизации работы изделия проводят начальные проверки характеристик, установленных в технических условиях на изделие.

Напряжение питания увеличивают до верхнего предельного значения и после стабилизации работы изделия проверяют требуемые характеристики. Выбирают плавный или скачкообразный режим изменения напряжения в зависимости от конкретных условий эксплуатации.

Напряжение питания уменьшают до нижнего предельного значения и после стабилизации работы изделия проверяют требуемые характеристики.

Изделие считают выдержавшим испытание, если при измененных значениях напряжения питания (увеличении или уменьшении) его характеристики находятся в пределах норм, установленных в технических условиях на изделие.

2.7.2.

Проверка сопротивления изоляции

Под воздействием приложенного напряжения электроизоляционные материалы проявляют свойство электропроводности. Электропроводность диэлектриков намного ниже, чем проводников, и вместе с тем эта характеристика диэлектриков играет важную роль в функционировании оборудования. Ток утечки диэлектрика имеет две составляющие: ток, проходящий по его поверхности, и ток, проходящий через диэлектрики. Отношение напряжения, приложенного к диэлектрику, к силе тока утечки называется сопротивлением изоляции. Сопротивление изоляции $R_{и}$ может быть определено соотношением

$$R_{и} = \frac{U}{I_{п} + I_{с}},$$

где $I_{п}$ — сила тока утечки по поверхности изоляции; $I_{с}$ — сила тока утечки через слой изоляции.

Сопротивление изоляции зависит от механических воздействий, температуры, проникающего излучения, состояния поверхности диэлектрика, качества обработки, сборки, пропитки и т. п.

Проверку сопротивления изоляции производят, как правило, в нормальных климатических условиях после воздействия механических и климатических факторов.

Нижний предел сопротивления изоляции должен быть:

- в холодном сухом состоянии ≥ 20 МОм;
- в нагретом состоянии ≥ 2 МОм;
- в увлажненном состоянии не менее 1 МОм.

В отдельных случаях может устанавливаться более низкий предел сопротивления изоляции.

Проверку сопротивления изоляции производят следующими способами: сетевым и ручным мегомметрами и с помощью вольтметра с определенным внутренним сопротивлением.

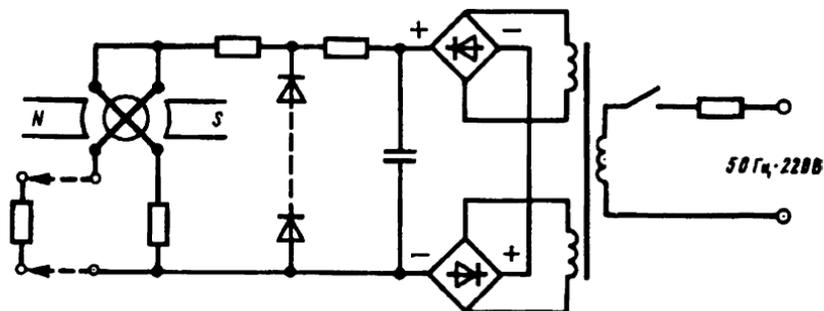


Рис. 2.120. Схема сетевого мегомметра

Схема сетевого мегомметра представлена на рис. 2.120. Сопротивление изоляции входа измерительных приборов должно превышать на порядок измеряемое сопротивление изоляции. Измерительное напряжение должно соответствовать рабочему напряжению измеряемой цепи. Регистрацию значений сопротивления изоляции проводят, как правило, через одну минуту после подачи измерительного напряжения.

Для измерения сопротивления изоляции наиболее часто применяются магнитоэлектрические мегомметры и мегомметры с использованием электронных автокомпенсационных схем.

2.8.

Химические испытания

Элементы конструкции КЛА могут подвергаться нормальным или ускоренным испытаниям на воздействие одной или нескольких (многокомпонентных) сред. Если в наборе химически активных компонентов есть компонент, который по своему влиянию до-

минирует над остальными, то обычно испытания проводят на воздействии только такого компонента.

Программа испытаний на химические воздействия агрессивных сред обычно содержит следующие этапы:

— выбор объекта испытаний, подвергающегося воздействию химически активной среды;

— определение параметра, по которому будет определяться работоспособность объекта при воздействии химически активной среды;

— выбор граничных значений, характеризующих работоспособность объекта;

— составление плана испытаний, выбор средств измерений, определение их необходимого количества и точности.

Оборудование, используемое для испытаний на воздействие химически активных сред, должно обеспечивать заданные значения концентрации, температуры, давления и относительной влажности специальной среды. Наиболее часто для проведения химических испытаний, после необходимых изменений в конструкции, используются серийно выпускаемые камеры тепла, влаги и грибообразования.

Камеры должны быть изготовлены из материалов, стойких к воздействию соответствующих специальных сред.

Обычно в качестве специальных сред для испытаний КЛА могут использоваться следующие виды компонентов: озон; пары компонентов ракетных топлив; пары топлив на основе нефтепродуктов; пары масел; пары смазок, щелочей, кислот, спиртов, фреонов, средств дезактивации, дезинфекции, дегазации, стерилизации.

Камеры должны иметь:

— приспособление для установки и крепления испытываемого образца;

— устройство для перемешивания специальной среды;

— устройство для ввода газообразной специальной среды, которое должно обеспечивать равномерность поступления газа в камеру и не допускать прямого попадания струи газа на аппаратуру;

— устройства для отбора проб среды, измерения температуры среды, удаления среды после окончания испытаний;

— электрические вводы;

— устройство для распыления дезинфицирующих и других растворов, которое должно обеспечивать заданные значения плотности орошения и давление раствора.

Конструкция камеры должна позволять размещать испытываемые объекты так, чтобы специальная среда имела к ним свободный доступ. Контакт образцов между собой и стенками камеры не допускается.

Проведение испытаний начинается с подготовки испытываемого объекта в нормальных климатических условиях. После этого осматривают

объект и определяют его параметры. Затем объект устанавливают в специальную камеру.

В процессе испытаний периодически контролируют концентрацию специальной среды путем анализа проб среды из камеры. Частоту контроля концентрации, температуры, давления и относительной влажности специальной среды устанавливают в зависимости от требований на испытания. После окончания испытаний камеру отключают, удаляют из нее специальную среду, извлекают из камеры объект и производят его внешний осмотр. После определенного времени проверяют состояние электрической изоляции (для аппаратуры) и измеряют другие параметры объекта.

Все работы со специальными средами должны проводиться в соответствии с правилами и инструкциями по технике безопасности. При испытаниях нельзя допускать контакт компонентов ракетного топлива — окислителя и горючего.

Обслуживающий персонал должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты (фильтрующими и изолирующими противогАЗами). После окончания испытаний специальную среду из камеры удаляют продувкой ее подогретым воздухом или азотом до концентраций специальной среды в отходящих газах, не превышающей предельно допустимых по санитарным нормам значений.

Контролю, в зависимости от объекта испытаний, могут подвергаться:

- состав различных материалов, применяемых для изготовления изделий;

- состав продуктов сгорания из камер двигателя для оценки полноты процесса сгорания топлива;

- состав различных топлив, смазочных масел, рабочих жидкостей и т.д.;

- техническое состояние двигателей и элементов конструкции ЛА по результатам анализов отработавших масел с помощью спектральных, рентгеноспектральных, оптических, химико-аналитических методов и др.;

- чистота топливных, масляных и других систем изделий, агрегатов технологических установок;

- чистота воздуха, используемого для заполнения гермокабин ЛА, на содержание токсичных микропримесей;

- экологические свойства горюче-смазочных материалов (токсичность, пожаро- и взрывоопасность, химическая агрессивность, гидролизуемость и т.д.).

2.9.

Биологические испытания

При эксплуатации, транспортировке и хранении ЛА может подвергаться воздействию биологических факторов. Биологический фактор — организмы или их сообщества, вызывающие нарушение исправного или работоспособного состояния объекта. Различают механическое, химическое и биологическое засорение.

Внешние биологические факторы делятся на три группы: растения, беспозвоночные животные и позвоночные животные.

В группу растений входят бактерии, дрожжи, грибы плесневые и дереворазрушающие, лишайники, высшие растения; в группу беспозвоночных животных — губки, черви, мшанки, моллюски, членистоногие, иглокожие; в группу позвоночных животных — рыбы, земноводные, пресмыкающиеся, птицы, млекопитающие.

Стойкость к воздействию биологического фактора — свойство объекта сохранять значение показателей в пределах, установленных нормативно-технической документацией, в течение заданного времени в процессе или после воздействия биофактора. Различают бактериостойкость, грибостойкость, микробиологическую стойкость.

Большинство повреждений элементов ЛА происходит под воздействием микроорганизмов и плесневых грибов.

Отклонения эксплуатационных параметров ЛА происходят из-за биозагрязнений и биозасорений.

Механические разрушения происходят под воздействием макроорганизмов.

Биохимическое разрушение вызывается микроорганизмами и плесневыми грибами.

Коррозия материала вызывается воздействием amino- и органических кислот и продуктов гидролиза.

Микроорганизмы могут вызывать изменения массы, водопоглощения и степени гидрофобности. Действие плесневых грибов приводит к коротким замыканиям в электрических системах, снижаются удельные объемное и поверхностное сопротивления, уменьшается прочность конструкции ЛА, загрязняются оптические изделия.

Материалы, применяемые для создания ЛА, должны обладать техническими свойствами, обеспечивающими защиту изделий от биоповреждений.

При экспериментальных исследованиях ЛА необходимо учитывать воздействие следующих биофакторов: насекомых, грызунов, плесневых грибов и микроорганизмов.

Испытания на биостойкость проводятся с целью определения спо-

способности изделий или их отдельных узлов сохранять в условиях воздействия на них биологических факторов значения показателей в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Грибостойкостью называют способность изделия противостоять развитию и разрушающему действию грибковой плесени в среде, зараженной плесневыми грибами. Испытания на грибостойкость рекомендуется проводить на изделиях, которые не подвергались другим видам испытаний. Для этих испытаний выбираются такие виды плесневых грибов, которые широко распространены, быстро растут, стойки к противогрибковым препаратам и способны наносить наибольший вред элементам и узлам ЛА.

Изделия поступают на испытания защищенными лаками или другими средствами, предусмотренными нормативно-технической документацией.

Испытания обычно проводят в нормальных климатических условиях.

Испытания проводят в такой последовательности: начальная стабилизация; исходные проверки и начальные измерения; обеспечение режима; конечная стабилизация; заключительные проверки и измерения. Время задержки в заданном режиме отсчитывают с момента достижения параметров испытательного режима.

Испытания на грибостойкость могут проводиться двумя методами.

При испытаниях по первому методу изделия помещают в камеру грибообразования или в эксикаторы. Антисептированные образцы испытывают отдельно от неантисептированных. Вместе с образцами помещают контрольную чашку Петри с питательной средой.

При испытаниях по второму методу изделия и контрольную чашку Петри с питательной средой опрыскивают с помощью пульверизатора водной суспензией спор грибов. Вся поверхность образцов должна быть опрыскана равномерно.

Приготовление водной суспензии, выращивание и хранение плесневых грибов производится в соответствии с ГОСТ 16962-71. При проведении испытаний на грибостойкость необходимо выполнять правила предосторожности из-за опасности заражения.

Перед проведением работ по выращиванию плесневых грибов и заражению ими испытуемых изделий необходимо приготовить специальные среды и простерилизовать их и употребляемую для работы химическую посуду.

В качестве питательной среды для выращивания плесневых грибов рекомендуется использовать синтетическую среду Чапек-Докса.

Глава 3. ПРЕДСТАРТОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

3.1.

Цели и задачи предстартовых и летных испытаний

В результате проектирования экспериментальной отработки комплекса ЛА устанавливаются содержание и порядок работ на предстартовом этапе и в ходе летных испытаний и создается основной сводный документ — программа летных испытаний.

Программа летных испытаний должна содержать следующие основные сведения:

- цели и задачи испытаний, последовательность решения задач, выносимых на летные испытания;
- объекты испытаний;
- объем испытаний;
- испытательные базы и средства проведения испытаний;
- порядок работ на технической и на стартовой позициях;
- перечень документов, регламентирующих предстартовую подготовку и обеспечение полета;
- распределение обязанностей между организациями, участвующими в испытаниях;
- мероприятия, обеспечивающие безопасность проводимых работ на старте, в ходе полета, спасательных и поисковых работ;
- методика анализа хода и результатов испытаний и порядок отчетности по испытаниям;
- порядок выявления дефектов, принципы классификации, определения значимости всех дефектов, обнаруженных в ходе подготовки и проведения испытаний, и рекомендации по устранению их в технической документации или проведению необходимых конструктивных доработок или изменений.

Целью летных испытаний опытной партии ЛА является оценка работоспособности общей конструктивной схемы ЛА и его агрегатов в

полетных условиях, подтверждение возможности выполнения основной задачи, для которой он создается: достижения заданной орбиты с заданной точностью и обеспечения ЛТХ согласно техническим требованиям на ЛА.

В результате первого этапа летных испытаний, часто называемого летно-конструкторскими испытаниями (ЛКИ), должны быть получены рекомендации для доработок конструкции ЛА и его систем и агрегатов в соответствии с техническими требованиями на создание ЛА.

При летных испытаниях решаются следующие задачи:

— исследование динамики движения ЛА как результата работы основных его систем и агрегатов в натуральных (полетных) условиях;

— изучение действительных условий работы систем и агрегатов, их отличия от наземных (стендовых, лабораторных) и предусмотренных в расчетах, уточнение этих условий по сравнению с условиями, имитированными при наземной отработке;

— получение экспериментальных материалов о работе систем и агрегатов в полетных условиях; изучение особенностей работы агрегатов, характерных только для полетных условий, например таких, как динамика изменения перегрузок и спада тяги после выключения двигателя, точность систем управления, навигации, ориентации и т.п. при воздействии линейных перегрузок и спектра перегрузок, создаваемых вибрацией;

— проверка совместимости работы всех составляющих систем и агрегатов комплекса на предстартовом этапе и в натуральных условиях испытаний.

Для отработки технологии предстартовой подготовки ЛА в ходе испытаний необходимо определить:

1) эксплуатационные качества ЛА при предстартовой подготовке и совместимость ЛА с комплексом агрегатов наземного оборудования;

2) достаточность представленного на испытания состава наземного оборудования, необходимого для эксплуатации ЛА;

3) правильность расстановки наземного оборудования на стартовой площадке;

4) объем и методику подготовки и испытаний ЛА на технической и стартовой позициях;

5) время развертывания и свертывания наземного оборудования и время, необходимое для подготовки и проведения пуска с момента поступления ЛА на техническую и стартовую позиции, а также план-график этих работ.

Выполнение этих работ имеет целью подтверждение возможности использования ЛА в условиях эксплуатации в соответствии с техническими требованиями.

Некоторые характеристики комплекса ЛА невозможно или затруднительно проверить на стадии проведения летных испытаний даже на

контрольно-сдаточном этапе. К таким характеристикам, например, относятся:

- надежность работы при температурах от +50 до -40° С;
- неизменность основных характеристик в заданный срок гарантии при хранении;
- возможность транспортировки на большие расстояния различного вида средствами.

Для проверки этих характеристик проводятся специальные испытания на стадии серийной отработки ЛА.

ЛА в комплексе с системами наземного обеспечения, поставляемые на предстартовые и летные испытания, должны быть укомплектованы всеми составляющими блоками и системами, прошедшими установленные виды наземной экспериментальной отработки и необходимые комплексные испытания на заводе-изготовителе.

Объекты, поставляемые на летные испытания, не должны иметь различий между собой; все изменения, потребовавшиеся в ходе экспериментальной отработки, должны быть внесены во все поставляемые изделия до начала комплексных заводских испытаний.

Заводские контрольно-проверочные испытания состоят из автономных испытаний систем, смонтированных на ЛА, и комплексных электрических испытаний на совместимость и функционирование составляющих систем и электрической кабельной сети ЛА, а также комплексных испытаний на герметичность баков и магистралей топливных систем и магистралей пневмосистемы ЛА.

Для повышения надежности объектов, поставляемых на летные испытания, в ходе наземной отработки проводятся комплексные огневые стендовые испытания ЛА в целом или его отдельных полностью укомплектованных ракетных блоков. Обычно все системы объекта автономно отработаны и проверены в условиях, близких к эксплуатационным. Так, например, двигатели проходят контрольно-выборочные испытания от каждой партии с последующими разборкой и анализом технического состояния после запуска. Обязательно также проводится сплошной контроль: каждый двигатель, поставляемый на летные испытания, проходит огневые контрольно-технические испытания с последующей переборкой или без переборки согласно техническому заданию. Все элементы конструкции, элементы и приборы всех составляющих систем автоматики, электрооборудования, управления, измерений, наземного оборудования и пр. также автономно отработаны в условиях, близких к эксплуатационным. Однако после сборки и монтажа всех систем ЛА и проведения заводских контрольно-проверочных испытаний данный объект может быть комплексно проверен в условиях, близких к эксплуатационным, только при проведении огневых приемочных испытаний.

Примером наиболее тщательной наземной отработки перед постав-

кой на летные испытания могут быть приемочные испытания ракетных блоков третьей ступени ракеты «Сатурн-5», которые не имеют резервирования по двигателям и, следовательно, должны обладать особо высокой надежностью. Контрольные испытания и проверки третьей ступени проходили в такой последовательности:

1. Контрольные испытания на заводе-изготовителе.
2. Приемочные испытания на контрольно-испытательной станции.
3. Предпусковые приемочные контрольные испытания.
4. Огневые приемочные испытания (ОПИ) на стенде.
5. Краткие контрольные испытания после ОПИ.
6. Заключительные приемочные испытания на контрольно-испытательной станции перед отправкой ступени на полигон.
7. Окончательный осмотр, взвешивание и подготовка к транспортировке.

На проведение огневых приемочных испытаний третьей ступени потребовалось 5 — 8 месяцев, но они выявили большое количество дефектов, причем некоторые из них были признаны критическими. Выявление и устранение этих дефектов на этапе огневых приемочных испытаний обеспечили безотказность работы ступени при проведении летных испытаний.

По каждой бортовой системе комплекса ЛА должно быть составлено заключение о ее допуске к летным испытаниям в составе ЛА.

Заключение о допуске системы на летные испытания должно быть всесторонним, оно должно содержать достаточно объективные основания для принятия решения о возможности перехода к этапу летных испытаний. В нем должны быть представлены необходимые сведения, отражающие состояние отработки системы как в целом, так и по конкретным экземплярам. Такими сведениями могут быть:

— данные по оценке выполнения комплексного плана отработки системы, перечень незавершенных мероприятий, не влияющих на начало летных испытаний, перечень вопросов, выносимых на этап летных испытаний;

— материалы по стендовой, комплексной отработке системы (отчеты, заключение, исследования и т.д.);

— заключение о пригодности системы в данной комплектации (с перечнем конструктивных отличий, отступлений, допущенных при изготовлении);

— данные о достигнутой надежности работы элементов, приборов и системы в целом.

Кроме того, на все объекты (системы) летных испытаний должна быть представлена расчетно-техническая и эксплуатационная документация, в том числе паспорта, формуляры, документация заводоизготовителей, относящаяся к монтажу и сборке, и пр.

В заключении о допуске систем к этапу летных испытаний должно

быть учтено, что при проведении различных проверок и испытаний элементы конструкции, узлы, приборы и агрегаты подвергаются многократному нагружению или включению, что приводит к выработке части заданного для них ресурса. В формулярах или паспортах на критические для полета элементы конструкции, узлы прибора и агрегата, имеющие определенный ресурс по времени работы или циклам нагружения, должны быть указаны эти ресурсы и их выработка к моменту отправки на полигон. Такими критическими по ресурсу узлами могут быть: блоки управляющих реле, пиросредства, мостиковые потенциометры, гелиевые шар-баллоны, насосы системы циркуляции криогенных жидкостей, управляющие и отсечные клапаны и многие другие, а также двигатели в целом при проведении огневых приемочных испытаний.

Ресурс для летных испытаний обычно гарантируют с большими запасами. Например, для узлов и агрегатов с ограниченным ресурсом блока третьей ступени «Сатурна-5» штатная продолжительность работы составляет от 2 до 12% от ресурса, к моменту же отправки на летные испытания после огневых приемочных испытаний ни один из узлов не вырабатывает более 30% ресурса, а сам двигатель вырабатывает не более 12% ресурса.

Объекты летных испытаний должны быть оборудованы измерительными системами в соответствии с принятой программой измерений. На измерительные системы также составляется заключение о допуске их к летным испытаниям на борту ЛА и в наземном комплексе.

Кроме того, должно быть подготовлено заключение о готовности служб испытательного полигона к проведению летных испытаний в составе всего комплекса ЛА.

3.2.

Принципы проведения предстартовой подготовки и летных испытаний

Основные принципы предстартовой подготовки, пуска и летных испытаний ЛА следующие:

1. Обеспечение заданной готовности к пуску и полету.
2. Получение необходимой информации на всех участках предстартовой подготовки и полета для определения ЛТХ, а также информации для проверки и уточнения условий, по которым обрабатывались в ходе наземной экспериментальной отработки все составляющие ком-

плекса ЛА системы и их основные элементы, включая внешние условия, условия взаимовлияния и совместимость работы всех систем в комплексе ЛА.

3. Непрерывный контроль основных узлов, агрегатов, приборов, систем, блоков, ЛА в целом в ходе каждой операции, проводимой с ними при предстартовой подготовке и в полете для обнаружения вероятных неисправностей на наиболее раннем этапе испытаний.

Этап летных испытаний является высшим уровнем иерархии экспериментальной отработки ЛА, на котором подтверждаются летно-технические характеристики ЛА как комплекс выходных характеристик составляющих систем.

Программы измерений при проведении предстартовой подготовки и летных испытаний должны быть достаточно информативными, так как в ряде случаев из-за неполноты или отсутствия информации при возникновении нештатных ситуаций приходится повторять испытания. Обычно программа измерений содержит не только измерения, проводимые на борту ЛА, но также большое количество измерений, обеспечивающих полную информацию как по работе наземного комплекса в ходе подготовки и пуска, так и в особенности по характеристикам взаимовлияния бортовых систем и наземного комплекса в ходе подготовки и пуска.

Требует тщательный анализ каждого выявленного дефекта, неисправности, отказа или непредусмотренного отклонения характеристик любой системы на любом уровне испытаний, поскольку дефект, признанный случайным или незначительным без проведения полного анализа причин его возникновения и возможных последствий, может в дальнейшем оказаться первопричиной аварийной ситуации в комплексе.

В современных космических программах большая часть трудовых затрат при предстартовой подготовке направлена на проведение испытаний и проверок. При использовании одноразовых, невозвращаемых ракет-носителей (РН), необходимо, чтобы все их элементы были тщательно проверены и испытаны для обеспечения максимальной вероятности успешного завершения полета. После старта полет уже нельзя отменить, равно как нельзя спасти ни оборудование, ни полезный груз, можно только с помощью специальной системы аварийного спасения спасти экипаж. Поскольку даже небольшие отказы в системах ракеты-носителя могут привести к неудаче всего полета, необходимо использовать такие критерии в проектировании и такую программу предпусковой подготовки, которые обеспечивают наибольшую уверенность в успешном выполнении каждого полета. Это требует резервирования систем, интенсивных проверок каждой из них и совокупности всех систем в целом в максимальном объеме.

Наиболее ответственные элементы ракеты-носителя зарезервиро-

ваны либо в виде одновременно действующих, параллельно подключенных в систему по отдельным каналам, либо в виде запасных образцов, однако и те и другие к моменту старта должны функционировать или быть готовыми к функционированию. Отрицательный эффект от любого дефекта будет тем больше, чем позже он будет обнаружен (имеется в виду также время, оставшееся до старта), поэтому максимальные усилия прилагаются к тому, чтобы распознать вероятные неполадки как можно раньше. Для этого испытания начинаются на уровне составляющих подсистем и продолжают непрерывно вплоть до самого старта ЛА. После старта ЛА также автоматически продолжают проверки его состояния для своевременной подачи команд на включение систем аварийного спасения, включение систем аварийного выключения двигателей (АВД), пожаротушения и других систем безопасности испытаний. Прогнозирование вероятных отказов, дефектов и других неисправностей в комплексе ЛА чрезвычайно затруднено, так как нештатные ситуации возникают, как правило, внезапно. Необходимо в возможно короткое время проанализировать их, принять решение о дальнейших действиях и приступить к их реализации, причем в процессе испытаний все эти операции, проводимые с составляющими частями или с комплексом ЛА в целом, должны быть проанализированы с точки зрения их влияния на характеристики надежности и эффективности.

Рассмотрим возможную схему проведения испытаний и проверок составляющих частей и комплекса ЛА одноразового действия.

Первый этап. Входной контроль комплектующих приборов, агрегатов, систем. Как правило, после изготовления комплектующих узлов, приборов, отдельных подсистем изготовитель проводит свои испытания в соответствии с техническими условиями (ТУ) на поставку этих изделий. Однако поскольку у разных изготовителей таких изделий различные технологические процессы, оснастка, методы контроля и т.д., а также поскольку транспортировка изделий от изготовителя до места сборки и хранение их могут повлиять на качество, то перед монтажом комплектующих изделий в системы или перед монтажом на ЛА проводится входной контроль. Этот контроль иногда может быть упрощенным визуальным, а в ряде случаев в соответствии с ТУ он может проводиться по полной программе проверки всех качеств изделия. Этот этап в большинстве случаев проводится в ходе заводских работ по изготовлению отдельных блоков ЛА, а также когда отдельные приборы или узлы доставляются для их установки или замены в условиях испытательного полигона.

Второй этап. Автономные испытания систем до монтажа на ЛА. В соответствии с конструктивными особенностями систем и принятой технологией сборки отдельные элементы до их постановки на ЛА должны быть смонтированы и согласованы как единая система. В этом

случае должны быть испытаны и проверены необходимые характеристики этой системы после проведенных монтажных работ и регулировки отдельных приборов, узлов или монтажных связей.

Третий этап. Автономные испытания систем после монтажа на ЛА. Монтаж отдельных составляющих систем (подсистем), подключение их к единой электрической кабельной сети, к общей пневмогидравлической системе, установка в герметизированных отсеках ЛА и др. могут существенно изменить какие-то качества этих систем, а также тех систем, с которыми они состыковались. Созданные вновь монтажные связи еще не проверялись. Ввиду этого необходим значительный объем автономных испытаний после монтажа систем на ЛА. Объем испытаний определяется конструктивными и технологическими особенностями этих систем. Испытания могут проходить как на заводе, так и при подготовке изделий на испытательном полигоне.

Четвертый этап. Комплексные испытания отдельных групп непосредственно связанных систем и комплексные испытания на уровне сборки ракетных блоков, головного блока и блоков космического аппарата. Вслед за проведением автономных испытаний систем после монтажа их на ЛА проводятся испытания на уровне каждой сборки. Сначала проводятся испытания отдельных групп-систем, непосредственно связанных между собой, например гидравлических клапанов и их управляющих систем с пневматическими и электрическими связями и т.п., затем — комплексные испытания всех систем на уровне данной сборки.

Под комплексными испытаниями обычно понимаются одновременные испытания двух или более систем.

Комплексные испытания на уровнях сборки блоков проводятся как на заводе, так и на испытательном полигоне, в зависимости от принятой комплектации. Однако даже при одинаковой комплектации комплексные испытания на этих уровнях сборки обязательно проводятся и на испытательном полигоне, так как после заводских испытаний операции, связанные с хранением и транспортировкой блоков, могли нарушить их качественные показатели.

Пятый этап. Автономные и комплексные испытания на уровне сборки ракеты-носителя и ЛА в целом. В ходе сборочно-монтажных работ при стыковке ракетных блоков и приборного отсека ракеты-носителя, головного блока или космического аппарата целый ряд отдельных блоков с помощью разъемных соединений объединяется в системы ракеты-носителя и ЛА. Это система навигации и стабилизации полета, автоматизированная система программно-временного управления полетом и др., а также все системы, которые имеют управляющие (счетно-решающие) устройства в приборном отсеке носителя, а чувствительные или исполнительные органы — в ракетных блоках каждой ступени. Следует отметить, что на этом уровне сборки впервые объе-

диняются в системе элементы систем разделения блоков, систем АВД, САС и другие.

Автономным испытаниям подвергаются системы, по которым велись сборочно-монтажные работы, комплексным испытаниям — группы связанных систем и ракета-носитель и ЛА в целом.

Шестой этап. Комплексные испытания ЛА на технической позиции (ТП) в штатных и нештатных ситуациях на функционирование циклограмм пуска и полета, с имитаторами наземного оборудования и систем, выполняющих необратимые операции. После проверки исправности всех систем на ТП проводятся комплексные испытания ЛА на выполнение каждой штатной операции по управлению подготовкой, проведением пуска и выполнению каждой операции по включению и выключению всех систем в соответствии с программой предстоящего полета. Однако при этом испытания происходят при неполной комплектации систем, а также с подключением имитаторов систем, выполняющих необратимые операции (например, пиротехнических средств, наполнителей пневмогидравлических систем, ДУ, элементов разрыва связей систем разделения и т.п.). Кроме того, подключаются имитаторы оборудования и связей наземного комплекса.

Проводятся также испытания на функционирование ЛА в нештатных ситуациях. Это прежде всего поканальная проверка резервированных систем; проверка функционирования систем безопасности и спасения, которые могут быть проверены только в условиях выдачи (или имитации) команды аварийной ситуации. Проверяется также отработка комплекса и в ряде других нештатных ситуаций, которые не предусмотрены как аварийные. В этих случаях отрабатываются действия операторов наземных пунктов управления полетом и экипажа ЛА при выходе из нештатных ситуаций.

Проводятся также комплексные испытания по отработке алгоритмов и программ бортовых вычислительных машин (БЦВМ) и управляющих автоматизированных устройств подготовки и проведения пуска и блокировок в случае нарушения последовательности операций, невыполнения операций или выдачи ложных команд. Например, на КА при проведении коррекции или торможения на орбите должны быть зафиксированы операции ориентации. При отсутствии этих операций двигатель коррекции или торможения будет заблокирован.

Седьмой этап. Комплексные испытания групп систем после транспортировки и установки ЛА на стартовой позиции (СП), монтажа (подключения) всех связей ЛА с наземным комплексом.

После транспортировки и установки ЛА на СП к ЛА подключается весь комплекс наземного оборудования, механические связи, пневмогидравлические связи (с необходимой опрессовкой их), электрические связи испытательно-управляющих и измерительных систем, систем наземного энергоснабжения и др.

Комплексные испытания проводятся во время и после окончания монтажных работ.

Восьмой этап. Комплексные испытания ЛА на СП на функционирование циклограмм подготовки и проведения пуска и циклограммы полета с имитацией необратимых операций.

Циклограммами пуска и полета обычно называют последовательность выполнения предстартовых операций и работы систем ЛА в полете, привязанную к отсчету во времени с помощью программно-временных устройств.

После получения положительного результата комплексных испытаний систем ЛА с наземным комплексом проводятся комплексные испытания ЛА на выполнение каждой штатной операции по управлению подготовкой, проведением пуска и выполнению каждой операции по включению и выключению всех систем в соответствии с программой предстоящего полета. В отличие от аналогичных операций на ТП, здесь полностью задействован весь комплекс комплектующих систем наземного оборудования и собственно ЛА. Однако и в этом случае приходится подключать имитаторы систем, выполняющих необратимые процессы, таких, как пиросредства, системы отделения блоков, разрыва связей ЛА с наземным комплексом, рабочего тела пневмогидросистем, двигательных установок, системы «окончания компонентов топлива» (ОКТ) и других.

Девятый этап. Проведение подготовки и пуска, непрерывный контроль при каждой операции управления подготовкой и проведением пуска. Контроль набора готовности.

В соответствии с циклограммой пуска проводятся все операции по подготовке комплекса ЛА к пуску. При этом происходит непрерывный контроль всех операций подготовки к пуску оператором с пульта управления. Кроме того, происходит автоматический контроль набора готовности к пуску, схема которого включает в себя регистрацию последовательности исполнения наиболее важных операций подготовки и блокировки начала необратимых операций при пуске в случае нарушения готовности. При установлении факта готовности комплекса оператором и автоматической схемой набора готовности выполняются необратимые операции и происходит пуск ЛА.

Десятый этап. Непрерывный контроль при пуске и в ходе полета для обнаружения нештатных, аварийных ситуаций и включения резервных систем или систем безопасности (САС, АВД, пожаротушения и т.п.).

При выполнении необратимых операций в ходе пуска и после старта ЛА при проявлении нештатных, аварийных ситуаций возможно только аварийное прекращение полета либо включение резервированных систем и систем безопасности на ЛА или в стартовом комплексе. Так, например, при обнаружении отклонений от заданных температурных режимов включается на стартовой позиции противопожарная си-

стема, могут включаться и системы пожаротушения в межбачковых пространствах ЛА. При отказах отдельных двигателей в ряде схем ЛА предусматривается дальнейший полет на оставшихся двигателях. При регистрации аварийных параметров происходит аварийное выключение двигателей, включение системы аварийного спасения пилотируемого корабля.

Таким образом, этот этап испытаний с помощью непрерывного контроля обеспечивает повышение надежности ЛА и существенно локализует последствия аварийных ситуаций.

Приведенная схема может рассматриваться как типовая. В зависимости от особенностей конструкции, технологии, степени отработанности комплектующих систем и ракетных блоков можно незначительно изменять эту схему, объединяя или перемещая отдельные операции. Трудоемкость и стоимость предстартовой подготовки ЛА одноразового действия очень высоки. Так, например, стоимость предстартовых операций для запуска наиболее крупной из космических систем США «Сатурн-5» — «Аполлон» с тремя космонавтами на борту составляет более 50 млн. дол. Затраты на изготовление одного штатного образца ракеты-носителя «Сатурн-5» составляют 185 млн. дол., основного блока корабля «Аполлон» — 55 млн. дол., лунной кабины — 41 млн. дол., обеспечение запуска — 59 млн. дол. То есть каждый запуск стоит более 300 млн. дол. Стоимость наземной предпусковой подготовки непилотируемой ракеты-носителя одноразового использования средней грузоподъемности «Атлас-Центавр» равна 0,5 млн. дол. Возможность снижения стоимости наземной предпусковой подготовки может быть реализована при переходе от ЛА одноразового действия к ЛА многократного использования. По предварительным оценкам, снижение затрат на сборку многократного транспортного космического комплекса (МТКК) с орбитальным самолетом (ОС) и предпусковые проверки возможно только в результате заблаговременного планирования межполетного обслуживания, при высокой степени автоматизации предпусковых операций, уменьшении количества обслуживающего персонала, высокой частоте пусков и повторяемости операций сборки и проверок. ОС похож на обычный самолет в том отношении, что небольшие отказы не вызывают катастрофических последствий. В случае аварийной ситуации ОС может вернуться на Землю неповрежденным вместе с полезным грузом. Поэтому длительные и дорогостоящие процедуры проверок, необходимые при эксплуатации одноразовых ракет-носителей, можно несколько упростить и сократить. Запланированная частота пусков ОС требует быстрой межполетной подготовки, но одновременно она гарантирует постоянный оперативный

контроль наземного оборудования. Это позволяет исключить многие ремонтные работы и промежуточные проверки наземных систем, которые необходимы, когда интервалы между запусками измеряются месяцами.

Принципиальной особенностью ОС является также использование бортовой системы контроля текущих параметров систем и элементов, а также диагностики их состояния, что существенно облегчает и упрощает межполетное техническое обслуживание ОС. Использование бортовой системы контроля и диагностики состояния заимствовано из авиации.

Бортовые системы контроля и управления предполагается использовать во время наземного межполетного обслуживания ОС. Бортовые ЭВМ сокращают область поиска неисправностей, и перед посадкой ОС уже будет известно, в какой системе произошел отказ. Поиск неисправных элементов в системах ОС является задачей одной из бортовых ЭВМ. Бортовая система контроля должна регистрировать показания датчиков для телеметрической записи с целью последующего их использования наземными службами во время предстартовой подготовки и проверок. Наличие записей позволит ускорить процесс межполетного технического обслуживания благодаря исключению ненужных проверок, выявлению областей существующих или потенциальных отказов и составлению планов периодических осмотров и проверок. К началу проведения межполетного технического обслуживания ОС перед очередным стартом МТКК система диагностики уже выявит те элементы ОС, в которых возможно появление отказов.

Ракета-носитель «Сатурн-5» с кораблем «Аполлон» в качестве полезной нагрузки связана с наземными системами многочисленными коммуникациями, которые проходят на борт ракеты через девять откидывающихся кабель-заправочных ферм на башне обслуживания транспортно-пусковой платформы. Кабель-заправочные фермы являются сложными, громоздкими и дорогостоящими устройствами. Во время запуска ракеты они отводятся с помощью гидроприводов, причем только две из них отводятся заранее, а остальные — в последние секунды предстартового отсчета времени или даже в момент отрыва ракеты от стартовой платформы. К надежности механизмов отвода кабель-заправочных ферм предъявляются повышенные требования, поскольку несвоевременный отход от ракеты хотя бы одной из ферм может привести к аварийной ситуации.

При подготовке к запуску ОС затраты на эксплуатацию, обслуживание и проверку кабель-заправочных ферм будут сведены к минимуму. Предполагается использовать не более двух подвижных ферм сравнительно простой конструкции, которые будут отводиться от ОС заблаговременно.

Некоторое упрощение обслуживания и уменьшение проверок при

подготовке к старту ЛА возможны благодаря переходу к модульной компоновке бортового оборудования, позволяющей уменьшить число монтажных соединений при сборке комплектующих систем.

3.3.

Объем летных испытаний

Определение объема летных испытаний — комплексная задача, связанная с особенностями вновь проектируемого ЛА: степенью новизны, эффективности и надежности, сложностью задач, поставленных в технических требованиях, особенностями конструкции, технологии изготовления и сборки, степенью отработанности составляющих частей ЛА и обслуживающего оборудования и возможностями комплексной наземной (или летной на других ЛА) отработки при воссоздании (имитации) эксплуатационных условий. Этап летных испытаний является только одним, хотя и высшим, уровнем иерархии экспериментальной отработки ЛА, он не может сам по себе, в отрыве от других этапов экспериментальной отработки, определять надежность ЛА. Этап летных испытаний должен подтвердить, что отработка на надежность всех элементов и составляющих частей ракетно-космического комплекса (РКК), структурный анализ комплекса и составляющих его систем проведены правильно, а эксплуатационные условия взаимосвязи и взаимодействия систем, отработанных при комплексных наземных испытаниях, с достаточным приближением подобны натурным условиям в полете.

В соответствии с этим вся комплексная программа экспериментальной отработки РКК (в том числе ЛА) призвана обеспечить нормальный полет ЛА с первого пуска, она должна обладать достаточной информативностью для подтверждения соответствия условий отработки всех систем, которые имитировались при наземной отработке, условиям полета.

В ряде случаев программа экспериментальной отработки может допустить, с учетом критериев стоимости и сроков, перенос исследования отдельных вопросов на этап летных испытаний. Испытания специально созданных для этой цели объектов позволяют более достоверно и с меньшими затратами, чем при наземной отработке, ответить на такие частные вопросы. Обычно и комплектация таких объектов бывает упрощенной, например ракета-носитель без полезного груза с весовым макетом, заполненным балластом, и др.

Исходя из изложенного, этап ЛКИ при оптимально спроектированной и проведенной экстремальной отработке ЛА требует двух-трех пу -

сков, причем все они должны быть успешными, т.е. должны выполнить полную задачу полета, при некоторых возможных отклонениях от штатных режимов, не влияющих на результат полета.

Этот вывод подтверждается статистическими данными по проведенным в США летным испытаниям (табл. 3.1).

Т а б л и ц а 3.1

СВОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО ЛЕТНО-КОНСТРУКТОРСКИМ ИСПЫТАНИЯМ

Ракета-носитель	Число пусков	Период проведения (гг.)	Полезный груз
«Авангард»	5	1956—1958	—
«Атлас-Кентавр»	8	1962—1966	Без полезного груза, весовой макет «Сервейора»
«Титан-3А»	2	1964	Балласт (свинец)
«Титан-3С»	10	1965—1967	Балласт (свинец), экспериментальные объекты
«Сатурн-1»	7(10)*	1961—1964	Балласт (вода, песок), макет «Аполлона»
«Сатурн-1В»	3(5)*	1966	Макет «Аполлона», без полезного груза
«Сатурн-5»	2(3)*	1967—1968	Макет «Аполлона» (частично действующий)

* Приведено число фактических пусков, а в скобках указано запланированное число пусков.

Для летных испытаний американских средних и мощных ракет-носителей характерно наличие этапа летно-конструкторской отработки испытаний, который предусматривает от 2 до 10 пусков (данные относятся к ракетам-носителям определенного типа без учета отработки отдельных блоков в составе различных носителей).

Следует отметить, что установлению причин отказов при ЛКИ и проведению доработок с возвратом на более низкий уровень экспериментальной отработки уделяется исключительно серьезное внимание. По результатам анализа отказа могут проводиться очень сложные работы. Например, после аварийного первого пуска носителя «Атлас-

Кентавр» был сделан полуторагодовой перерыв в выполнении программы ЛКИ, в течение которого была значительно доработана ступень «Кентавр» с отработываемой водородно-кислородной ДУ.

Дополнительным подтверждением обоснованности и эффективности выбранной программы экспериментальной отработки и объема ЛКИ следует считать результат дальнейших летных испытаний ракет-носителей семейства «Сатурн». Так, с января 1961 г. по январь 1972 г. проведено 25 пусков (в том числе 12 пусков по программе ЛКИ), все пуски можно считать успешными.

Количество пусков, проводимых при летных испытаниях, непостоянно, оно варьируется в широких пределах в зависимости от сложности, степени новизны, технологичности комплекса ЛА, а также от исходного уровня надежности ступеней ракеты-носителя и ЛА в целом, достигнутого в результате наземных испытаний.

Общей тенденцией экспериментальной отработки ЛА является сокращение числа ее объектов при одновременном повышении информативности испытаний и применении совершенной измерительной техники, а также многократности использования стендовых экспериментальных образцов (ступеней). В наибольшей степени эти требования реализуются при летной отработке ЛА многократного использования.

3.4. Требования к испытательным базам и средствам проведения испытаний

ЛА поступают на испытательную базу (полигон) собранными в различной степени в зависимости от своих габаритов, массы и конструктивной сложности. Так, ЛА одноступенчатые, а также имеющие малые габариты и массу, транспортируются с завода-изготовителя целиком или же ракета-носитель доставляется отдельно от космического аппарата. Более мощные и многоступенчатые ракеты-носители поступают на полигон в виде отдельных частей или собранных раздельно ступеней, блоков ракеты-носителя и ступеней космического аппарата или головного блока.

Таким образом, на испытательном полигоне должны осуществляться необходимые испытания и сборка ракетных блоков (ступеней), а также заданные испытания КА и сборка ракеты-носителя с отсеком полезного

груза КА, подготовка к пуску и пуск ЛА. Для проведения этих работ испытательный полигон должен обладать соответствующим комплексом специальных сооружений и оборудования.

Основными объектами испытательного полигона являются техническая позиция, стартовая позиция и командно-измерительный комплекс. Оборудование полигона, как правило, подразделяется на специальное технологическое и общетехническое.

Технологическое оборудование объединяет разнообразные и многочисленные средства транспортировки, погрузки, сборки, монтажных работ, испытаний, установки ЛА на пусковую систему, заправки компонентами топлива и сжатыми газами, подготовки к пуску, пуска и управления и др.

Общетехническое оборудование включает оборудование электросилового, газоснабжения, термостатирования, осветительное, отопительное, приточно-вытяжной вентиляции, пожаротушения, связи, дистанционного и автоматического управления и др.

На полигоне размещаются также вспомогательные и обслуживающие объекты и системы: хранилища транспортных средств и агрегатов обслуживания, хранилища компонентов топлива, системы энергоснабжения, жилой комплекс и другие объекты.

Техническая позиция (ТП) представляет собой комплекс инженерных сооружений со специальным техническим оборудованием, подъездными путями и другими средствами, обеспечивающими прием, хранение, сборку ступеней ЛА, головного блока или КА, автономные и комплексные испытания отдельных систем, отдельных ступеней, носителя в целом и в сборке с КА. На ТП располагаются монтажно-испытательный корпус сборки и испытаний собранного ЛА, монтажно-испытательный корпус КА и другие служебные помещения.

В монтажно-испытательном корпусе имеются рабочие места для проведения всех сборочных, монтажных и контрольно-проверочных работ, предусмотренных на ТП для ЛА, а также контрольно-проверочная аппаратура, обеспечивающая проведение необходимых испытаний с регистрацией и анализом полученных измерений по результатам испытаний.

При положительных результатах испытаний на ТП ЛА перекладывается на транспортно-установочный агрегат или транспортно-установочную тележку и доставляется на стартовую площадку стартового комплекса.

Одним из основных требований к ТП полигона является прежде всего возможность создания необходимого количества рабочих мест для проведения указанных выше монтажных и испытательных работ с ЛА заданных габаритов, укладываемых в габариты зданий ТП как по площадям, так и по высотам. При отсутствии таких возможностей

в имеющихся зданиях приходится заранее предусматривать строительство новых корпусов.

Все специальное техническое оборудование должно быть проверено на возможность его применения к работам на данном ЛА. Если оно непригодно для такого использования, должно быть спроектировано, изготовлено и установлено в монтажно-испытательном корпусе (МИК) новое оборудование.

Стартовая позиция (стартовый комплекс) представляет собой совокупность сооружений и зданий, оснащенных специальным технологическим оборудованием, общетехническим оборудованием, подъездными путями.

Стартовая позиция (СП) предназначена для установки, подготовки и проведения пуска ЛА, а также для размещения наземного оборудования, автоматики дистанционного управления пуском ЛА и контрольно-испытательной аппаратуры.

Основным объектом стартового комплекса считается стартовое сооружение с пусковой системой, обеспечивающее прием ЛА, подвод к нему электрических, заправочных, пневматических, дренажных, противопожарных и других коммуникаций.

Пусковая система обычно размещается в стартовом сооружении, в котором также располагаются аппаратура дистанционного управления пуском, испытательное и контрольно-проверочное оборудование, элементы заправочных систем, источники электропитания и т.п.

После установки ЛА на пусковую систему, наведения и подключения к нему всего наземного оборудования и всех наземных коммуникаций проводятся комплексные испытания с помощью проверочно-пускового оборудования и измерительных систем с фиксированием и анализом полученных результатов испытаний.

При положительных результатах контрольно-проверочных испытаний с помощью средств системы дистанционного управления пуском проводится пуск ЛА.

Основные требования к СП — это обеспечение возможности проведения работ по подготовке к пуску ЛА, удобство стыковки всех средств наземного оборудования с ЛА, безопасность проводимых работ при пусках, ремонтпригодность для восстановления пусковых устройств.

Оборудование СП должно быть укомплектовано необходимыми средствами дистанционного управления пуском и контрольно-проверочным оборудованием со средствами измерения, обеспечивающими максимальную автоматизацию проводимых работ.

Стартовая позиция должна также включать определенную зону в круговой площади радиусом в несколько километров и в угловом секторе направления полета для обеспечения безопасности в районе падения первых ступеней мощных носителей и падения ЛА при нештатных ситуациях полета.

Испытательный полигон также должен располагать необходимыми техническими средствами и сооружениями в районе штатного приземления КА или головного блока ракеты для обеспечения необходимой информации по траекторным измерениям и по телеметрическим измерениям состояния объекта и его систем.

Аппаратура командно-измерительного комплекса (КИК) включает в себя радиотелеметрические станции, радиопередающие, радиоприемные устройства, антенные установки, телевизионные установки, линии автоматической обработки полученных данных, вычислительные машины, аппаратуру службы единого времени, средства связи, источники питания и другое оборудование. Измерительные пункты, кроме одного пункта, расположенного вблизи стартовой позиции, обычно рассредоточиваются на значительных расстояниях друг от друга для обеспечения гарантированного приема информации по всей траектории полета и имеют линии связи для передачи информации в центр управления полетом. Служба единого времени для всех пунктов общая.

КИК полигона должен обеспечить получение, обработку и анализ необходимой информации, как оперативной, так и полной. КИК обеспечивает необходимые функции по связи с бортом ЛА для работы систем безопасности полигона при нештатных ситуациях, а также выполняет информационные функции для центра управления полетом при пусках КА.

3.5.

Испытания на технической позиции

В зависимости от типа ЛА, характера и степени сборки и способа транспортировки его на техническую и стартовую позиции определяются объем и порядок испытательных работ на ТП. Для средних и тяжелых (со стартовой массой 300 т и более) ЛА, доставляемых в виде отдельных ракетных блоков, ступеней носителя, его приборного отсека, а также отдельных отсеков полезного груза, сначала проводятся подготовка и контрольно-проверочные испытания отдельных блоков (ступеней), затем — последовательные стыковки, сборка и монтаж блоков, ракеты-носителя в целом с последующей стыковкой головного блока или КА. Каждый этап монтажно-сборочных работ сопровождается соответствующим циклом контрольно-проверочных работ.

3.5.1.

Испытания блоков ЛА

Блоки ЛА доставляются в МИК и устанавливаются на свои рабочие места. Производится внешний осмотр (визуальные проверки) целостности элементов конструкции блоков и их комплектующих систем.

Затем проводятся комплексные испытания отдельных групп непосредственно связанных систем и комплексные испытания на уровне сборки блоков ЛА (в соответствии с четвертым этапом испытаний рассмотренной схемы).

Испытываются электрические схемы на целостность и изоляцию цепей в обесточенном состоянии и под током.

Проводится испытание герметичности пневматической системы, системы горючего, системы окислителя и систем двигателя.

Проводятся электрические комплексные испытания всех электро-механических устройств после подключения их к кабельной сети данного блока, в том числе систем контроля уровня топлива, подготовки, запуска и выключения двигательной установки блока.

После окончания комплексных испытаний и проверок на уровне сборки отдельных блоков производится сборка всех блоков носителя.

Существуют два способа сборки комплекса ЛА:

- 1) горизонтальная сборка в МИКе, последующая транспортировка и установка ЛА на пусковую систему в вертикальное положение;
- 2) вертикальная сборка ЛА в МИКе, транспортировка в вертикальном положении на пусковой платформе и установка на пусковое устройство.

Первый вариант сборки не требует строительства высотного МИКа, создания транспортера для перемещения в вертикальном положении ЛА и специального пути. Недостатками этого варианта являются сборка ЛА в нерабочем положении, необходимость дополнительных повторных комплексных испытаний на стартовой позиции, вызванная установкой ЛА в вертикальное положение.

Второй вариант сборки требует строительства дорогостоящего здания вертикальной сборки, однако позволяет уменьшить объем испытаний и проверок на стартовой позиции, а также позволяет подстыковывать многочисленные заправочные, пневматические и электрические коммуникации к ЛА в МИКе.

В случае вертикального способа сборки ЛА работы по проверке отдельного блока первой ступени проводят уже в высокопролетной части МИКа на подвижной пусковой платформе, доставленной на ТП, что позволяет провести целый ряд монтажно-сборочных работ, связанных с установкой ЛА на пусковую платформу и подстыковкой большого количества разъемных соединений ЛА со стартовым комплексом.

Вторая ступень состыковывается с первой. Состыковываются все разъемные соединения ступеней. Проверяются электрические цепи в обесточенном состоянии и под током, а также пневмогидравлические коммуникации, система дистанционной блокировки, топливная и двигательная системы.

При наличии третьей, четвертой и т.д. ступеней они последовательно стыкуются со второй ступенью, а приборный отсек носителя — с последней ступенью. При этом проводятся испытания электрических цепей в обесточенном состоянии и под током, испытания герметичности систем наддува, а также других пневмогидравлических коммуникаций топливных и двигательных систем ступеней.

Проводятся также испытания аппаратуры приборного отсека: программно-временных устройств, управляющих, регулирующих, навигационных и других систем, которые были собраны в ходе стыковки.

Проверяется целостность и изоляция электрических цепей, целостность нитей пирозапалов, функционирование модулей пирозапалов и герметизированных разъемов, разобщенность командных цепей, функционирование распределительных устройств, программно-временных устройств, электропневмоклапанов, пневмоэлектрических реле и других элементов схемы.

Для каждой ступени ЛА и собранной ракеты-носителя проверяются статические и динамические характеристики автомата стабилизации: статические — в виде отношения углов отклонения управляющих органов к углу отклонения оси ЛА, а динамические — в виде сдвига фаз между этими параметрами при задаваемых стандартных частотах ($f = 0,5; 1,0$ Гц) тестового тока. Проверяется полярность автомата стабилизации, т.е. правильность знаков отклонений чувствительных — командных и исполнительных — органов.

Кроме штатных комплексных испытаний, проводимых в условиях безотказности всех систем носителя или ЛА, проводятся и «нештатные» комплексные испытания с имитацией отказов некоторых систем и обработкой выхода из этих ситуаций и проверкой работы имеющихся резервных систем, которые не могут быть проверены в штатных условиях. Такими «нештатными» комплексными испытаниями могут быть:

— испытания при непрохождении команды на отрыв ЛА от стартового стола;

— испытания с выключением двигательных установок отдельных ступеней, в том числе, например, от датчиков остатков топлива в баках или от других датчиков, показания которых приняты как «аварийные» параметры в системе АВД;

— испытания по проверке функционирования резервных систем, каналов, агрегатов, вводимых в действие при нештатных ситуациях.

3.5.2.

Испытания космического аппарата

Целью конструкторских и летно-приемочных испытаний КА является подтверждение способности конструкции удовлетворять всем требованиям эксплуатации в условиях, воссоздание или имитация которых возможны на ТП, а также выявление скрытых дефектов в материалах и производственных процессах.

Объем и сложность работ, проводимых при испытаниях на ТП, зависят от типа КА.

Общими задачами испытаний всех типов КА являются:

а) проверка герметичности и температурных режимов отсеков КА в условиях, имитирующих космические;

б) определение динамических параметров КА: массы объекта, центровки (балансировки), моментов инерции, угловой скорости вращения КА и времени раскрытия агрегатов;

в) проверка функционирования электрических систем и герметичности отсеков при вибрации;

г) исследование радиочастотных взаимосвязей и интерференции, совместимости диаграмм направленности антенн радиосистем командных и измерительных линий и линий связи;

д) проверка пиротехнических средств и других систем, определяющих необратимые операции;

е) испытания по проверке готовности каждой системы КА;

ж) комплексные проверки КА по выполнению всех штатных операций данной программы полета, а также возможности выхода из нештатных ситуаций при вероятных отказах систем объекта или носителя.

Осмотр, испытания, сборка и комплексные проверки КА происходят в монтажно-испытательном корпусе космических объектов (МИК КО).

Испытаниям на герметичность подвергается вся конструкция в целом, а также отдельные герметичные отсеки. Исходя из требований высокой надежности КА и обнаружения возможной негерметичности на более раннем этапе подготовки КА, испытания на герметичность проводят после доставки КА на ТП, после каждой монтажной и сборочной испытательной операции, могущей повлиять на герметичность, а также перед заправкой КА или стыковкой его с ракетой-носителем.

Основной способ проверки КА на герметичность — испытание объекта в барокамере. Перед началом испытаний герметичные отсеки КА заполняются безопасным для конструкции и не вызывающим коррозии текучим газом определенной концентрации. Если гермоотсеков несколько, то они индивидуально наддуваются различными газами, что облегчает локализацию течей. Виды и концентрация применяемых газов устанавливаются в ТУ на КА. Обычно используют гелий, а в ряде

случаев — азот. Давление газа внутри отсека устанавливают номинальным, обычно 10^5 Па, а при первых конструкторских испытаниях иногда до $2 \cdot 10^5$ Па.

КА устанавливается в барокамере, давление в которой понижается до 4 Па или ниже. Длительность испытаний зависит от типа КА и устанавливается в ТУ на КА.

Интенсивность утечки должна измеряться с помощью масс-спектрометра. Допустимая суммарная утечка устанавливается в ТУ на КА.

Если при испытаниях необходимо определить место негерметичности, то обычно применяют способ гелиевого течеискателя, для чего испытуемый объект заполняют смесью гелия с воздухом или азотом определенной концентрации под избыточным давлением и обходят его наружную поверхность гелиевым течеискателем. При появлении гелия на поверхности объекта, свидетельствующем о локальной негерметичности, отклоняется стрелка индикатора течеискателя и изменяется тембр звукового сигнала.

В тех случаях, когда объект по габаритам не может быть помещен в барокамеру или испытуемый элемент (отсек) находится внутри КА, герметичность проверяют по спаду давления: испытуемый элемент заполняют сжатым воздухом или газом и в течение определенного промежутка времени по манометру фиксируют величину спада давления.

Для воспроизведения *температурных режимов* используются два метода:

1) воспроизведение ожидаемых теплоизлучений в вакууме (космическая тепловая радиация);

2) помещение КА в вакуумную камеру с заданными предельными значениями температур (термовакuumные испытания).

Для проведения этих испытаний КА должен быть закреплен в местах, определенных на основе теплового расчета КА и по конструктивным соображениям.

Если для испытаний принят первый метод, то давление в барокамере доводится до значений ниже $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. При этой глубине вакуума укомплектованный КА подвергается испытаниям в условиях теплового облучения. Интенсивности теплового облучения должны соответствовать верхнему и нижнему пределам, при которых КА должен сохранять свою среднюю температуру. При изменении интенсивности облучения следует регулировать термические градиенты объекта или его элементов в соответствии с ожидаемыми по расчету.

Если для испытаний выбран второй метод, то испытания проводятся в три этапа: испытания на коронный разряд, холодные испытания, горячие испытания.

Цель испытаний на коронный разряд — установить, что в процессе перехода к условиям вакуума на испытуемом объекте нет существенных электрических разрядов. При этих испытаниях КА дол-

жен быть включен в рабочий режим вывода на орбиту с включением откачки термовакуумной камеры, давление в которой должно быть доведено до $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па при обычной температуре. Темп откачки должен быть согласован по возможности с барограммой запуска. По достижении давления $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па КА переключается на рабочий режим орбитального полета. После испытаний на коронный разряд продолжается откачка камеры до получения в ее рабочем объеме давления ниже $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Температура стенок камеры понижается до уровня стабильной температуры холодного испытания.

После холодных испытаний температура камеры должна быть повышена с таким расчетом, чтобы вывести КА на стабильную температуру горячего испытания согласно расчету.

При прохождении переходных температур КА должен быть включен на рабочий режим. При этом подтверждается отсутствие отказов при промежуточных температурах.

Длительность выдержки при этих испытаниях определяется типом объекта и его программой полета. Ускоренные испытания могут применяться с учетом проверки стабильности режимов сокращенных по времени испытаний и проверки в аналогичных режимах комплектующих КА элементов или систем.

Определение массы, центровки и моментов инерции необходимо для расчета характеристик КА при запуске и его ориентации во время вывода на орбиту и орбитального полета, а также на режимах управляемого спуска. Центровка и моменты инерции должны быть определены для состава КА в период работы последней ступени и для его орбитального состава, если он отличается от первого. Центровка и моменты инерции (относительно оси вращения, а также максимальные и минимальные моменты относительно поперечных осей) определяются на незадействованном КА и сравниваются с проектными значениями. Примерные значения допустимых отклонений для массы $\pm 0,15\%$, для смещения центра тяжести $\pm 1,5+2,0$ мм, для моментов инерции $\pm 1,5\%$.

Испытания в рабочем режиме вращения и проверка раскрытия агрегатов подтверждают устойчивость КА к нагрузкам, возникающим при вращении. Во время этих испытаний электрические и механические системы КА должны находиться в рабочих режимах. Испытания следует проводить в специальной камере с максимальным приближением к реальным условиям нагружения при вращении. При этих испытаниях КА с работающими системами раскручивается до реальной скорости вращения в соответствии с заданной программой. Также в штатной последовательности должны быть проверены все устройства, раскрываемые под действием центробежной силы вращения и с помощью специальных средств. При этом целесообразно специальное регулирование атмосферного давления и применение других мер для предотв-

ращения или ослабления нежелательных влияний земного притяжения, сильно отличающегося по интенсивности от космического.

Виброиспытания КА следует проводить для нагружений, соответствующих работе двигательных установок, входящих в состав КА и возбуждающих виброперегрузки при включениях, для нагружений, создаваемых синусоидальными вибрациями, и нагружений, создаваемых случайными вибрациями.

При испытаниях первого вида КА прикрепляется к вибратору в точках крепления двигателя. Раскрывающиеся элементы и панели КА при этом должны быть раскрыты в соответствии со штатным режимом. Уровни виброперегрузок и порядок их приложения должны быть записаны в ТУ. При проведении виброиспытаний второго и третьего вида КА прикрепляется к вибровозбудителю (вибратору) с помощью штатного переходного устройства (отсека) и штатной системы крепления.

Вибронагрузки прилагаются к основанию переходного устройства в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений, одно из которых параллельно оси тяги.

Герметичные отсеки должны быть наддуты до давления, превышающего предстартовое на 10^5 Па. КА должен находиться в рабочем режиме старта. Необходимы тщательное наблюдение и проверка функционирования всех систем и телеметрии, работающих во время старта. Антенны и другие приборы, раскрывающиеся или изменяющие свою форму после вывода на орбиту, при испытании должны находиться в стартовом положении.

Для контроля вибронагрузок, прилагаемых к КА, на стыке переходного устройства с нагружающим приспособлением вблизи КА необходимо жестко установить тарированный датчик перегрузок. Направление оси чувствительности этого датчика должно быть согласовано с направлением прилагаемых вибраций. Другие датчики устанавливаются в критичных местах на конструкции и на системах КА в соответствии со специальными требованиями к агрегатам, динамическими расчетами и т.д. Частоты синусоидальных вибраций назначаются в соответствии с динамическими расчетами в достаточно широком диапазоне от 10 до 2000 Гц, скорость изменения частоты обычно принимается равной 2 — 4 окт./мин. Перегрузка выбирается в пределах от нуля до максимума 1,5 — 2,0 на малых частотах и 5 — 7 на больших частотах. Обращают особое внимание на выявление резонансных режимов, особенно на частотах порядка 30 Гц.

Испытания в условиях случайных вибраций с распределением по закону Гаусса проводят в пределах частот 20 — 2000 Гц с перегрузками (среднеквадратичными) 8 — 12 продолжительностью 2 — 4 мин по каждой оси.

Испытания на радиочастотную интерференцию и совместимость имеют целью проверку взаимовлияния систем. Электрические

и электронные системы и оборудование КА должны удовлетворительно работать не только в отдельности, но и в совокупности с радиооборудованием носителя и наземных средств, а также в непосредственной близости к радиооборудованию командных, измерительных — радиотелеметрических, радиолокационных и других — систем радиосвязи. Это означает, что радиочастотная интерференция от этих и других источников не должна оказывать вредное влияние на КА. Более того, КА не должен быть источником помех и интерференционных влияний на свои собственные системы, на системы носителя, на другие КА, наземное контрольное оборудование.

При испытаниях на восприимчивость к электромагнитным помехам и при определении излучаемых помех необходимо руководствоваться ТУ. Порог деградации или наступление отказа должны быть определены в виде напряженности электрического поля (в вольтах на метр) на ближней периферии вокруг КА.

При проверках определяется влияние излучаемых помех в полосе частот работы передатчиков, комплектующих КА, помех, наводимых по линиям питания и сигнализации.

Проводятся также испытания на восприимчивость к воздействию радиочастотных полей путем облучения КА радиочастотами возможного широкого диапазона.

Любой дефект (отклонение параметров от допустимых пределов) в работе радиоприемных систем КА требует тщательных исследований на частотах, при которых выявился дефект. Выходная мощность источника сигналов (помех) должна быть уменьшена до такого уровня, при котором дефекты перестают появляться. Этот уровень и дает количественную оценку восприимчивости приемного оборудования к внешним радиопомехам.

На каждом КА проводится определение диаграмм направленности каждой антенны. Особенно тщательно проверяются диаграммы остро-направленных антенн (ОНА). Испытания должны проводиться до тех пор, пока результаты измерений не будут соответствовать требованиям проекта.

Все испытания следует проводить в условиях, когда уровень внешнего электромагнитного фона достаточно невысок и не оказывает влияния на измерения электромагнитной интерференции. В ряде случаев испытания проводят в специальной «безэховой» камере — помещении, облицовка стен которого не отражает радиоволн, благодаря чему исключается появление внешнего фона и искажение радиосигналов. Такого рода испытания подвергаются КА, в программе которых предусмотрена стыковка с другими объектами с помощью радионаведения.

Для предотвращения возможности преждевременного срабатывания *пиротехнических устройств* КА должен быть проверен на всех рабочих режимах полета и в условиях наземной эксплуатации на ус-

тойчивость против высоковольтного разряда, вызываемого накоплением электростатических зарядов, и на устойчивость против блуждающих электрических токов. Аналогичные проверки проводят и для ряда других систем, определяющих необратимые операции, например электроклапанов для выравнивания давления в гермоотсеках и других устройствах.

Испытания по проверке готовности каждой системы, входящей в состав бортовых систем КА, или так называемые автономные испытания систем, проводят после окончания сборки и монтажа этих систем и подключения их к единой бортовой электрокабельной сети КА. Проводятся испытания электрических цепей в обесточенном состоянии и под током, проверяется целостность изоляции цепей и отсутствие замыканий на корпус.

Испытываются на герметичность пневмогидравлические системы, электропневмоаппаратура и электромеханические устройства автоматики.

После получения положительных результатов автономных испытаний переходят к *комплексным испытаниям*. Они проводятся в определенной последовательности для проверки типовых сочетаний одновременно работающих систем, и число таких испытаний довольно значительное. Так, например, при подготовке корабля «Союз» для совместного полета с «Аполлоном» предусматривалось проведение 11 комплексных испытаний для проверки выполнения штатной программы, а также еще 6 комплексных испытаний для проверки работоспособности корабля в нештатных ситуациях.

Результаты комплексных испытаний должны подтвердить, что все операции, предусмотренные программой данного полета, выполняются по жесткой программе, зафиксированной в системе программного управления КА, которая управляет работой различных электромеханических и пиротехнических устройств в заданной последовательности. Примерами операций при такого рода программном управлении являются: отделение КА от носителя, ориентация и стабилизация КА в заданном направлении, при запуске и работе тормозных двигателей, раскрытие парашюта и начало работы посадочных средств.

Кроме того, результаты комплексных испытаний должны подтвердить, что все предусмотренные команды, выдаваемые командной радиолинией (КРЛ), выполняются бортовыми системами. Основными командами такого типа являются введение дополнительных, дискретных исполнительных команд, подлежащих немедленному выполнению, введение гибких или резервных программ, изменение времени введения жестких программ и т.п., введение так называемых команд-«установок», которые вырабатываются исходя из данных анализа фактического полета и должны вводиться заранее, до начала выполнения задаваемых операций. Командами-«установками» могут быть углы ориентации

КА при коррекции траектории, углы направленности остронаправленных антенн при последующих сеансах связи и т.п.

Для пилотируемых КА проводятся комплексные проверки нештатных ситуаций, при которых экипаж переходит на ручное управление, вручную включает резервные или аварийные системы или совершает другие возможные операции для выхода из аварийных ситуаций. Аналогично отрабатываются действия операторов наземных пунктов управления полетом при выходе из возможных нештатных ситуаций.

После получения положительных результатов испытаний КА транспортируется в монтажно-испытательный корпус для стыковки с ракетой-носителем. До сборки с ракетой-носителем предусматривается заправка КА компонентами топлива, сжатыми газами, рабочими телами систем терморегулирования, жизнеобеспечения, систем ориентации и др. Такая заправка происходит на специальной заправочной станции.

3.5.3.

Испытания ЛА в целом

После завершения испытаний и заправки КА транспортируется и устанавливается на подготовленный к сборке РН.

Вслед за установкой и стыковкой КА и проведением сборочно-монтажных работ выполняются автономные пневмогидравлические и электрические испытания отдельных систем и комплексные испытания групп связанных систем и испытываемого объекта в целом в соответствии с общими принципами проведения испытаний (см. разд. 3.2, этапы 5 и 6).

Автономные испытания проводятся для тех систем, которые были собраны в ходе стыковки РН и КА. Такие испытания включают проверку цепей пиропатронов сброса головного обтекателя и отделения КА, проверку пневмомагистралей и цепей связи бортовой кабельной сети космического объекта с последней ступенью носителя и системы отделения КА от РН, проверку цепей связи бортовой кабельной сети РН с системой аварийного спасения и др.

Далее проводятся две группы общих проверок ЛА: первая — с целью подтверждения правильности функционирования систем радиосвязи, систем АВД, наддува, топливной системы, систем двигателей, стабилизации и управления, систем обнаружения аварий и аварийного спасения; вторая — с целью подтверждения правильности функционирования всех систем в процессе запуска и полета. Сюда входит имитация старта, срабатывания электрических разъемов, отвода ферм обслуживания и др.

После завершения общих испытаний проводятся комплексные проверки в условиях имитации пуска и полета. При этом проверяется функционирование всех систем ЛА в процессе выполнения последовательности всех операций, предусмотренных циклограммами пуска и полета. Цель этих комплексных испытаний — подтверждение правильности функционирования систем ЛА в период нормального минусового счета и ускоренного плюсового счета. При этом имитируется нормальный профиль траектории в соответствии с полетным заданием на данный запуск ЛА. При положительных результатах испытаний ЛА готов к отправке на стартовую позицию.

3.5.4.

Система комплексных проверок

Автоматизированная система проведения комплексных испытаний и проверок ЛА или его основных частей (РН, КА, отдельных блоков) должна обеспечивать: введение оператором определенных тестовых или штатных программ в каждый контролируемый элемент, получение информации об исполнении заданной тестом или программой операции, сравнение этой информации с ожидаемым результатом исполнения операции и отображение результата анализа (или сравнения) проверенного испытания на соответствующем индикаторе на пульте у оператора. В случае отклонений от нормальных показателей система контроля и диагностики проводит поиск неисправности в комплексе, выявляя дефект в отдельной системе, агрегате, приборе, элементах бортовой кабельной сети или других элементах связи на стыках систем.

В соответствии с этим всякая система проведения комплексных испытаний и проверок ЛА состоит из трех составляющих: оператор, управляющий испытаниями; объект испытаний; устройство связи и обмена информацией между оператором и объектом.

Оператор должен иметь: набор алгоритмов, преобразованных в программы испытаний; априорный результат ожидаемой нормальной работы объекта в виде определенных значений контролируемых параметров объекта, который будет сравниваться с фактическим результатом проверки; перечень возможных нештатных ситуаций, алгоритмы и программы идентификации и поиска неисправности и выхода из возможных нештатных ситуаций. Оператор обеспечивается средствами введения необходимых программ испытаний и проверок, а также индикаторами, демонстрирующими результат испытаний.

Объект испытаний содержит большое количество контрольных то-

чек, оборудованных соответствующими измерительными средствами и адресными выводами.

Устройство связи и обмена информацией между оператором и объектом испытаний обеспечивает передачу программ испытаний и проверок от оператора к объекту с распределением их по адресам соответствующих параметров объекта, отображает, анализирует и передает информацию от объекта на индикаторы оператора.

По мере усложнения комплексов ЛА и увеличения количества контролируемых параметров объекта испытаний значительно усовершенствовались системы комплексных испытаний и проверок.

В настоящее время устройства связи и обмена информацией представляют собой комплекс быстродействующих вычислительных машин, одна группа которых находится в месте расположения оператора — в центре управления запуском, а другая — на борту ЛА или в непосредственной близости от ЛА на агрегатах наземного комплекса. Эти группы ЭВМ соединены уплотненными линиями связи или наземными проводами либо радиотелеметрическими каналами связи.

Наличие этих групп ЭВМ позволяет реализовать выбор и передачу программ испытаний, обработку и кодирование информации, анализировать информацию непосредственно на объекте испытаний и передавать в центр управления только значимую информацию о состоянии объекта.

Рассмотрим более подробно систему комплексных проверок РН «Сатурн-5» и ЛА «Сатурн-5» — «Аполлон».

Данная система может быть отнесена к системам проверки «среднего» поколения, так как она не имеет бортовых ЦВМ, а располагает ЭВМ, находящейся рядом с ЛА на пусковой платформе, поскольку при методе вертикальной сборки, принятом в данном случае, пусковая платформа используется при сборке носителя на ТП и транспортируется вместе с ЛА на стартовую позицию.

Для проведения комплексных испытаний РН и ЛА в целом в здании сборки на ТП и на СП используется система автоматической проверки с управлением от вычислительной машины. После сборки РН через высокоскоростную систему передачи данных соединяется с центром управления запуском для комплексной проверки и испытания системы в условиях имитации пуска и полета.

Здание центра управления запуском примыкает к зданию для вертикальной сборки ЛА и находится на расстоянии 5 км от стартовой площадки.

На пусковой платформе установлены вычислительная машина РСА-110А и оборудование, необходимое для обслуживания и проверки ракеты. Наряду с этим в центре управления запуском установлены машины РСА-110А и оборудование для управления и контроля операций обслуживания и проверки. Вычислители связаны системой передачи

данных таким образом, что вычислитель на пусковой платформе получает команды от вычислителя в центре управления запуском и передает данные обратно.

Управление системой проверки РН «Сатурн-5» осуществляется из центра управления запуском. С помощью пульта управления пуском и индикаторного устройства в процессе предстартовых операций производится проверка каждой ступени. Каждый сигнал проверки обрабатывается в вычислительном комплексе и посылается на объект испытаний. Ответный сигнал от объекта направляется в вычислительный комплекс, и результат анализируется в индикаторном устройстве. Основные элементы системы, проверки и их функциональная взаимосвязь показаны на рис. 3.1.

Переключатель пульта управления запуском может включить начало любой отдельной операции проверки какого-либо компонента системы или выдачу из вычислителя команды на выполнение полной последовательности испытаний.

Для предотвращения неправильного вызова необходимой программы проверки непосредственно перед работой в пульт вставляется пластмассовая кодированная перфокарта — ключ. Команды, паузы и запросы на выдачу данных вводятся в систему включением соответствующих командных переключателей на пульте управления.

Полная программа испытаний начинается посылкой сигнала на пульт управления. Сигнал подается на распределитель подпрограмм в центре управления запуском, откуда он поступает в аппаратуру соответствующей обработки сигнала для подготовки засылки его в вычислительный комплекс центра управления запуском. Вычислители центра и пусковой платформы связаны таким образом, чтобы выполнить всю последовательность проверок. Вычислительный комплекс на платформе посылает сигнал в аппаратуру обработки сигнала, находящуюся на платформе, а затем на коммутационные стойки каждой ступени. После этого сигнал направляется к оборудованию конечного распределения 18 и через промежуточный распределитель 22 опрашивает датчики ракеты. Выходные сигналы с датчиков направляются обратно для обработки и анализа в вычислительный комплекс пусковой платформы. Результат анализа посылается затем в вычислительный комплекс центра управления запуском, который направляет его на пульт управления для демонстрации.

На пульте управления предусмотрен ручной контроль функционирования систем ЛА. При этом контрольный сигнал не проходит через вычислители, а направляется к ЛА по прямому проводу. Результат также отсылается обратно в индикаторное устройство по прямой линии. Система сбора цифровой информации (система группы 3) собирает сигналы — ответы на команды проверки от ЛА и вспомогательного оборудования, формирует данные проверки для передачи на пусковую платформу и в центр управления запуском. Эти данные вводятся также в вычислительный

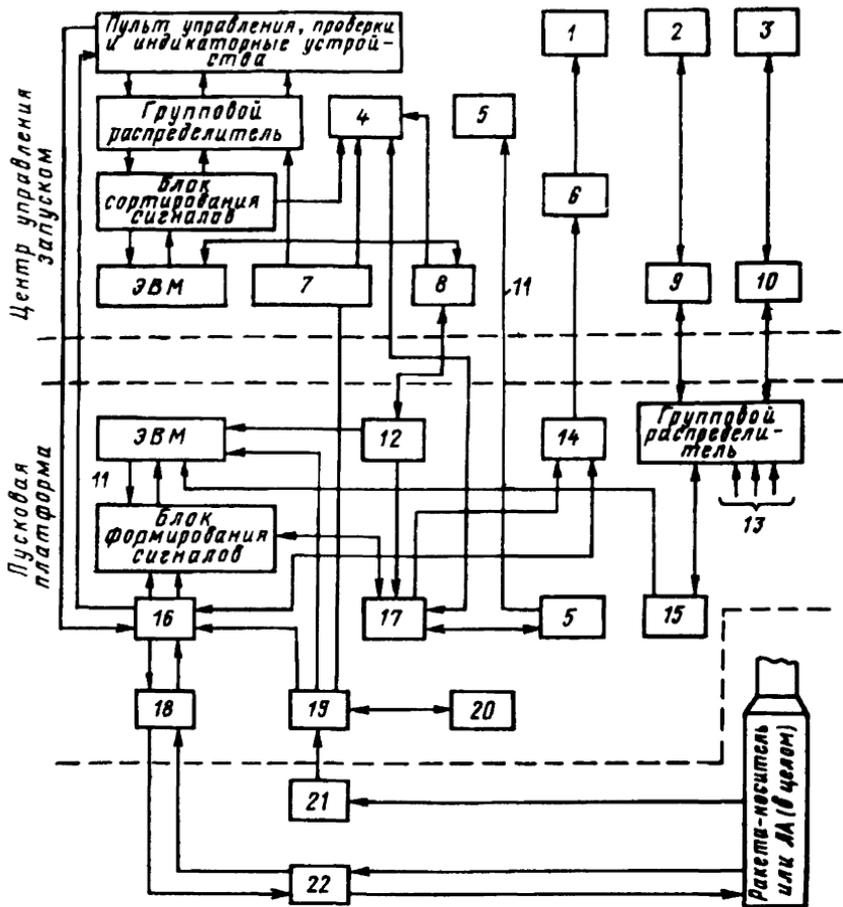


Рис. 3.1. Схема системы предстартовой проверки:

1 - печатающее устройство системы регистрации дискретных сигналов (системы группы 1); 2 - пульт системы контроля компонентов топлива; 3 - индикаторное и печатающее устройство системы регистрации дискретных сигналов (системы группы 2); 4 - аппаратура распределителя сигналов системы сбора цифровой информации (системы группы 3); 5 - распределение и контроль питания; 6 - пульт системы группы 1; 7 - приемная аппаратура системы группы 3; 8 - система отсчета времени; 9 - аппаратура передачи данных; 10 - система отсчета времени; 11 - линии прямого вызова контрольных сигналов; 12 - аппаратура системы отсчета времени; 13 - вход данных от систем наземного оборудования; 14 - система группы 1; 15 - система контроля топлива; 16 - аппаратура коммутации; 17 - система релейных плат; 18 - аппаратура конечного распределения; 19 - аппаратура сбора и передачи информации системы группы 3; 20 - наземный передатчик системы группы 3; 21 - распределитель системы сбора информации группы 3; 22 - промежуточный распределитель сигналов

для обработки и демонстрации, а также для управления проверкой с помощью вычислителя. Система сбора цифровой информации состоит из телеметрической аппаратуры, аппаратуры передачи данных, наземных станций приема, осуществляющих передачу данных.

Для регистрации состояния входных линий и выдачи печатных данных с отметками времени обнаружения изменений в состоянии входа используются блоки оценки работы системы по цифровым данным (системы групп 1 и 2). С целью обеспечения синхронной или задержанной оценки данных высокоскоростные печатающие устройства в центре управления запуском соединены с каждым блоком.

Для регистрации дискретных событий используются две системы: система группы 1 и система группы 2.

Система группы 2 расположена в помещении оконечной аппаратуры связи со стартовой площадкой, а ее печатающее устройство — в центре управления. Она контролирует 768 выходных линий, связанных с заправкой топлива, контролем параметров окружающей среды, контролем подачи воды и с системой сбора цифровой информации (система группы 3).

Система группы 1 расположена в пусковом столе, а печатающее устройство и пульт дистанционного управления — в центре управления. Эта система контролирует до 4320 дискретных сигналов от систем наземного обеспечения стартового наземного оборудования системы группы 3.

Вычислительный комплекс состоит из двух вычислителей широкого назначения типа РСА-110А и вспомогательного оборудования (печатающего устройства, читающего устройства, перфоратора, устройства, считывающего с магнитной ленты, и лентопротяжных механизмов). Вспомогательное оборудование обеспечивает дополнительный объем для хранения данных, является входным устройством при вводе последовательности проверок в память вычислителя и выходным — при записи обработанных данных.

Вычислительная система контроля уровня топлива определяет и контролирует количество горючего и окислителя в каждой ступени. При выкипании жидкого кислорода и жидкого водорода по командам этой системы производится дозаправка компонента до номинального уровня. Управление системой осуществляется с контрольного пульта.

С помощью телевизионной системы стартовая команда управления запуском осуществляет визуальное наблюдение за подготовкой ЛА. Это обеспечивается 60 камерами, 27 из которых расположены на пусковой платформе, 15 — на стартовой площадке, 12 — на подвижной башне обслуживания и 6 — в центре управления. Изображение, получаемое от любой камеры, может демонстрироваться на экране размером 3×3 м в центре управления запуском.

3.6. Испытания на стартовой позиции и пуск ЛА

После завершения испытаний на технической позиции ЛА транспортируется на стартовую позицию. С помощью установщика ЛА переводят в вертикальное положение и устанавливают над пусковой системой, сближая его опорные элементы с опорами пусковой системы до соприкосновения. Затем ЛА закрепляют ветровыми и штормовыми креплениями. В случае сборки и транспортировки ЛА в вертикальном положении на пусковой платформе производят установку платформы на пусковое устройство и ее крепление.

Производят наведение ЛА, состоящее из вертикализации продольной оси ЛА с помощью опор или домкратов пусковой системы и азимутального наведения — совмещения плоскости стабилизации ЛА с плоскостью пуска путем разворота ЛА в горизонтальной плоскости с помощью поворотного круга (погона) пусковой системы или соответствующего ориентирования гироскопа бортовой системы управления в плоскости крена ЛА.

Для обеспечения выполнения различных операций в процессе подготовки и проведения пуска ЛА, установленный на пусковой системе, соединяется с наземными стартовыми системами через электро-, пневмо- и гидромеханические разъемные соединения, образуя так называемые связи «Земля — борт».

Некоторые ЛА поступают на СП с пристыкованными наземными коммуникациями и кабель-мачтами; в этом случае состыковывают коммуникации с ответными частями стартового сооружения.

В ходе проведения стыковочных и монтажно-сборочных работ, образования связей «Земля — борт» из многочисленных систем наземного комплекса и бортовых систем ЛА создается единый комплекс.

Впервые этот комплекс создается (собирается) на стартовой площадке, что требует для проверки и обеспечения его высокой надежности значительного объема испытаний.

Первая группа испытаний проводится для проверки обеспечения правильного функционирования всех систем, собранных на СП из отдельных частей (групп элементов).

К таким системам можно отнести, например, системы заправки, состоящие из заправочного оборудования, гидравлических коммуникаций (заправочных шлангов, горловин, клапанов и др.) и электропневматических управляющих коммуникаций и арматуры, участвующих в

операции заправки как на борту ЛА, так и на наземном оборудовании и в командно-измерительных системах обеспечения запуска.

К этим системам относятся системы наземного, предстартового наддува топливных баков, системы продувки баков нейтральными газами, системы термостатирования и кондиционирования, системы электрических, энергетических связей «Земля — борт» с входящими разрывными и отрывными штепсельными разъемами и отрывными платами, системы устройства связи и обмена комплексных проверочных и управляющих систем подготовки и проведения старта и другие системы.

После получения положительного результата испытаний указанных выше групп систем переходят к комплексным испытаниям готовности комплекса, включающего носитель, космический аппарат (или головной блок) и комплекс систем наземного оборудования, к выполнению последовательности стартовых операций.

Циклограмму пуска реализует программно-временное устройство (ПВУ), которое выдает в фиксированное заданное время команду на проведение очередной операции.

Распределительные механизмы ПВУ включают в себя исполнительные органы, выполняющие эту операцию. Выдача команды ПВУ и ее исполнение исполнительными органами обязательно фиксируются измерительно-пусковой системой.

Количество операций предстартового цикла зависит от типа ЛА, его сложности, количества ступеней носителя, количества систем наземного обслуживающего оборудования.

Например, полный перечень операций предстартового цикла для ракеты-носителя «Сатурн-5» с орбитальной станцией «Скайлэб» состоит из 1500 пунктов и составляет книгу объемом 200 страниц.

В табл. 3.2 приведена выборка из циклограммы пуска РКК типа «Сатурн-5» — «Аполлон», которая позволяет представить комплекс предстартовых операций, типовое время проведения операций и последовательность работ по подготовке пуска ЛА и его осуществлению.

Следует отметить, что нарушение последовательности операций, установленной циклограммой пуска, приводит к тяжелым последствиям. Контроль за соблюдением последовательности предстартовых операций обычно осуществляется с помощью автоматических систем набора готовности и вручную по информации, полученной на индикаторных устройствах. Циклограмма полета также содержит привязанные по времени все операции автоматического управления полетом.

В любой момент может произойти остановка отсчета ПВУ, вызванная неисправностью оборудования или другими причинами.

После остановки отсчета цикл либо прекращается, либо возобновляется. Это зависит от характера предыдущих операций, выполненных на ЛА.

**ЦИКЛОГРАММА ПУСКА
(ВРЕМЕННОЙ ГРАФИК ПРЕДСТАРТОВЫХ ОПЕРАЦИЙ)**

Время до момента отрыва ЛА от пусковой платформы (ч, мин, с)		Операция
Начало	Конец	
1	2	3
9:30:00,0	-	Переключение системы кондиционирования с воздуха на азот
8:59:00,0	1:30:00,0	Проверка систем наведения и управления
8:59:00,0	-	Заправка шаровых баллонов газообразным азотом
8:59:00,0	1:00:00,0	Предварительная заправка баллонов третьей ступени гелием комнатной температуры
8:59:00,0	8:54:00,0	Проверка устройств контроля заправки
8:57:00,0	6,27:00,0	Продувка кислородного бака первой ступени азотом
8:34:00,0	7:39:00,0	Предварительное заполнение кислородного бака второй ступени азотом
8:34:00,0	7:42:00,0	Продувка водородного бака второй ступени гелием
8:34:00,0	8:16:00,0	Продувка гелием магистралей циркуляции водорода второй ступени
8:00:00,0	-	Подвод электропитания к приборному отсеку
8:00:00,0	7:40:00,0	Заправка баллонов раскрутки второй ступени гелием
8:00:00,0	0:04:00,0	Работа вспомогательного гидравлического насоса второй ступени

Продолжение табл. 3.2

1	2	3
7:42:00,0	4:54:00,0	Подготовка к заправке водородного бака второй ступени
7:40:00,0	7:28:00,0	Наддув разделительной полости ТНА второй ступени
7:39:00,0	7:04:00,0	Продувка кислородного бака второй ступени азотом
7:28:00,0	7:13:00,0	Продувка полостей камер сгорания двигателей второй ступени гелием
7:04:00,0	6:54:00,0	Захолаживание и медленная заправка кислородного бака второй ступени (0 — 5%)
6:44:00,0	6:30:00,0	Быстрая заправка кислородного бака второй ступени (5 — 96%)
6:30:00,0	6:27:00,0	Медленная заправка кислородного бака второй ступени (96 — 99%)
5:45:00,0	0:03:06,0	Подпитка кислородного бака второй ступени
4:54:00,4	4,36:00,0	Захолаживание и медленная заправка водородного бака второй ступени (0 — 5%)
4:36:00,0	4:16:00,0	Быстрая заправка водородного бака второй ступени (5 — 98%)
4:16:00,0	4:11:00,0	Медленная заправка водородного бака второй ступени (98 — 100%)
3:33:00,0	0:03:06,0	Подпитка водородного бака второй ступени
3:28:00,0	0:52:30,0	Посадка космонавтов в корабль
1:40:00,0	1:10:00,0	Проверка системы обнаружения неисправностей
0:57:00,0	0:47:00,0	Выверка азимута
0:51:30,0	-	Окончательная проверка командной коммуникационной системы

Продолжение табл. 3.2

1	2	3
0:51:25,0	0:46:25,0	Предполетная проверка систем управления
0:43:00,0	0:05:00,0	Отвод ферм обслуживания в исходное положение
0:42:00,0	-	Включение системы САС
0:31:30,0	0:30:00,0	Проверка захолаживания водородного насоса второй ступени
0:25:00,0	-	Включение системы обеспечения безопасности полета
0:20:30,0	-	Окончательная проверка телеметрических систем
0:13:00,0	0:08:00,0	Продувка полостей двигателей второй ступени гелием
0:10:00,0	-	Проверка готовности к запуску
0:10:00,0	0:00:08,9	Захолаживание камеры сгорания двигателей второй ступени
0:05:30,0	-	Взведение предохранительных устройств
0:03:07,0	-	Начало автоматического отсчета времени до запуска
0:03:07,0	0:00:30,0	Предстартовый наддув кислородного бака второй ступени
0:01:37,0	0:00:30,0	Предстартовый наддув водородного бака второй ступени
0:00:50,0	-	Переход на питание от бортовых источников
0:00:30,0	0:00:17,0	Отвод фермы обслуживания в районе межбакового отсека первой ступени
0:00:16,2	0:00:11,0	Отвод верхней фермы обслуживания первой ступени

1	2	3
0:00:08,9	0:00:06,7	Команда на зажигание двигателей первой ступени
0:00:05,3	-	Фиксация выхода на режим отдельных двигателей первой ступени
0:00:01,0	-	Фиксация выхода на режим всех двигателей первой ступени
0:00:01,0	0:00:00,0	Открытие захватов

После остановки отсчета при возобновлении цикла производится возвращение к определенной точке отсчета, указанной в инструкции на запуск.

Проворачивание представляет собой цикл операций, необходимых для возврата к определенной точке отсчета, остановки на этой точке до возобновления отсчета и завершения отсчета от точки повторного начала до момента времени, равного нулю.

Характер операций при остановке и возобновлении цикла определяется различными факторами, зависящими от рабочих условий состояния ракеты-носителя, космического аппарата и наземного оборудования.

Если происходит остановка отсчета после начала заправки баков ЛА криогенными компонентами топлива и после этого необходим доступ к РКК для устранения причин остановки отсчета, то требуется значительное время для проведения операций по проворачиванию.

В зависимости от операций, которые необходимо произвести при проворачивании в период времени от начала заправки до старта ЛА, могут быть рассмотрены различные ситуации.

В первой из возможных ситуаций либо не требуется подвижная башня (или ферма) обслуживания для обеспечения доступа к ЛА, либо она еще не отводилась и связи «Земля — борт» не нарушались. Операции, необходимые для проведения проворачивания с целью устранения неисправностей, предусматривают слив криогенных компонентов топлива, очистку баков, проверку наличия опасных концентраций газа, установку ферм обслуживания и отключение предохранительных и взводящих устройств. После устранения неполадок предохранительные взводящие устройства вновь включаются, отводятся фермы обслуживания и отсчет возобновляется в соответствии с циклограммой и с учетом операций, проведенных до обнаружения неисправностей.

Во второй ситуации необходимые осмотры, проверки или устранение неполадок, требующие доступа к ЛА, невозможны без подвижной башни (фермы) обслуживания, без восстановления связей «Земля — борт». Поэтому наряду с операциями, описанными выше, производится подвод (подведение) и установка башни (фермы) и восстановление связей «Земля — борт».

В зависимости от момента остановки отсчета и задержки пуска устанавливается располагаемое время на устранение неисправностей. Отсчет возобновляется в соответствии с циклограммой. Возможны также другие ситуации, когда становится очевидным, что устранение причин, вызвавших остановку отсчета, потребует большего времени, чем располагаемое. Операции, проводимые в этом случае, могут включать замену батарей на носителе и космическом аппарате, обслуживание различных систем (жизнеобеспечения, ориентации), возобновление ресурсов, расходуемых топлив и газов и др. В этом случае время запуска сдвигается, и отсчет возобновляется с момента, определяемого новым графиком подготовки предстартовых работ.

Автоматической системой набора готовности к пуску РКК производится контроль за последовательностью исполнения операций готовности систем к проведению старта и полета.

Система готовности к запуску связана с устройствами включения датчика автоматического конечного отсчета времени до запуска. Для ряда систем команда включения датчика называется «Ключ на пуск».

Включению этого датчика во многих системах должно предшествовать снятие трех блокировок. Первая блокировка снимается оператором, включающим вручную блок питания датчика. Вторая блокировка снимается автоматически от системы набора готовности к запуску. Третья блокировка снимается нажатием переключателя команды запуска на пульте управления запуском первой ступени носителя. При снятии всех этих блокировок импульс в момент включения от часового механизма ПВУ приведет в действие датчик конечного отсчета времени до запуска.

В блокировочное устройство системы набора готовности к запуску обычно занесено много критических параметров систем, событий и условий, таких, например, как положение закрытия клапанов газогенераторов и всех главных топливных клапанов, готовность систем обнаружения неисправностей, САС, АВД, завершение подготовки пироустройств, нормальные гидравлические давления, готовность КА к запуску, нормальное напряжение источника питания воспламенителя (зажигания), завершение подготовки стартового оборудования и др.

При несоответствии норме какого-либо из этих компонентов включается блокировочное устройство и предотвращается таким образом начало работы датчика конечного отсчета («Ключ на пуск»). После включения автоматической последовательности отсчета он может

быть остановлен лишь при передаче сигнала на отключение, так как остановка отсчета в этом случае не предусмотрена.

Возможность ручного отключения может быть использована в том случае, если оператор, осуществляющий проверку, обнаружит аварийную ситуацию. Ручное отключение можно осуществить в любой момент времени между началом работы датчика конечного отсчета и моментом расстыковки разъемов.

В ряде схем управления запуском принимают, что датчик конечного отсчета времени может быть выключен автоматически при следующих возможных нештатных ситуациях:

1. Логическое отключение первой ступени. Сигнал на отключение появляется в случае информации от внутренних источников об отключении двигателя или о неправильном функционировании какой-либо из систем обеспечения безопасности полигона.

2. Выход из строя главного топливного клапана первой ступени.

3. Неисправность электропитания датчика последовательности отсчета. Сигнал на отключение выдается при недопустимых значениях питающего напряжения. Эта неисправность в дальнейшем устраняется подключением нового датчика с питанием от батареи.

4. Недопустимое отклонение напряжения в линиях электропитания первой ступени. Сигнал на отключение выдается при отклонении выходного напряжения от номинального на любой из главных шин или на приборной шине.

5. Неполадки в системе обнаружения неисправностей. Эта блокировка происходит в период между моментом перехода на питание от бортовых источников и моментом отрыва штексельных разъемов. Сигнал на отключение выдается с помощью одного из командных элементов ручного отключения из КА.

6. Неисправность приборного отсека. Эта блокировка тоже происходит между моментом перехода на питание от бортовых источников и моментом отрыва штеккеров. Отсутствие сигнала готовности приборного отсека носителя к запуску в течение этого периода вызывает отключение. Блокировочное устройство готовности приборного отсека контролирует электросистемы приборного отсека и наличие команды на запуск первой ступени.

Комплексные испытания готовности РКК с проверкой выполнения последовательности стартовых операций по циклограмме пуска и операций по циклограмме полета проводятся так же, как и при штатном (натуральном) отсчете, за исключением необратимых и неисполняемых операций, которые имитируются.

Основные имитируемые операции:

1. Все фермы и башни обслуживания не отводятся.

2. Все полетные штексельные разъемы и межблочные связи не разъединяются.

3. Все воспламенители, индикаторы, пиросредства, аварийные устройства и детонационные шнуры не срабатывают.

4. На борту корабля отсутствуют космонавты.

5. Отсутствует криогенное топливо на борту носителя.

После получения положительного результата комплексных проверок готовности комплекса начинается подготовка к штатному отсчету проведения пуска РКК.

Перед пуском РКК должны быть отключены или сняты все имитаторы, с помощью которых проверялись необратимые или неисполняемые операции, отстыкованы и отведены все коммуникации, кроме тех, которые участвуют в процессе пуска; отведены на безопасное расстояние агрегаты обслуживания; отправлен в безопасную зону или укрытие обслуживающий персонал, не занятый при пуске; приведены в полную готовность противопожарные и другие средства безопасности полигона.

Все работы по предстартовой подготовке и пуску РКК выполняются по командам системы дистанционного управления предстартовыми операциями и проверочно-пускового оборудования; выполнение операций фиксируется на пульте оператора пуска набором транспарантов готовности. Предстартовые операции выполняются автоматически или дистанционно, при этом исключается необходимость нахождения обслуживающего персонала у РКК.

При проведении пуска РКК задействуются все необходимые системы стартового комплекса, безопасности полигона, радиотелеметрические, радиолокационные и другие измерительные системы, все службы и пункты командно-измерительного комплекса. Готовность всех систем комплекса и включение их в работу определяются по графику, привязанному к системе единого времени. Нулевое значение единого времени уточняется по моменту фактического старта ЛА — сигналу отрыва контакта подъема от плоскости стартового стола. Все данные измерений привязываются к этой уточненной точке начала отсчета.

Анализ результатов полета на активном участке носителя с космическим объектом проводится по данным радиотелеметрических и радиолокационных измерений.

Изменение программы полета на активном участке может произойти при нештатных, аварийных ситуациях с помощью автоматически действующих систем, вырабатывающих команду на переключение резервированных систем (например, выключение отдельных двигателей при многодвигательной схеме ЛА) или на аварийное прекращение полета.

Полет КА на орбитальном участке происходит под непрерывным контролем наземного командно-измерительного комплекса во взаимодействии с экипажем КА, и программа полета может быть изменена с учетом фактических условий полета.

Глава 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ

4.1. Система испытаний как объект автоматизации

4.1.1. Назначение и состав систем испытаний

При проведении испытаний автоматизация способствует более полной и всесторонней проверке принятых проектных, конструкторских и технологических решений, научно-технических гипотез и теорий, определению свойств, характеристик и возможностей объектов испытаний, получению требуемого объема и качества испытательной информации.

По степени использования технических средств и их возможностей различают следующие уровни автоматизации: механизированный, автоматизированный и автоматический.

Применение технических средств во всех компонентах процессов и относящихся к ним системах характеризует высший уровень автоматизации — уровень комплексной автоматизации.

Комплексная автоматизация экспериментальной отработки КЛА и их элементов представляет собой сложную и многогранную проблему, объединяющую целый ряд научно-технических, экономических и социальных задач. Способ их решения во многом зависит от типа, целей, этапов и операций испытаний, специфики объектов испытаний, задач, функций и алгоритмов испытательных систем.

Испытания представляют собой упорядоченную во времени и пространстве последовательность действий, работ, мероприятий и операций по подготовке, проведению и обработке результатов испытаний, а также совокупность средств и методов их выполнения.

Процесс испытаний протекает в рамках организационно-технической системы испытаний (СИ). СИ представляет собой совокупность средств, методов испытаний и исполнителей, взаимодействующих с объектом испытаний (рис. 4.1).

СИ состоит из подсистем, основными из которых являются:

- объект испытаний;
- испытательный комплекс;
- система планирования и программирования испытаний;
- система обеспечения испытаний (комплекс обеспечения);
- система обработки экспериментальных данных;
- система организационного, информационного, математического и программного обеспечения.

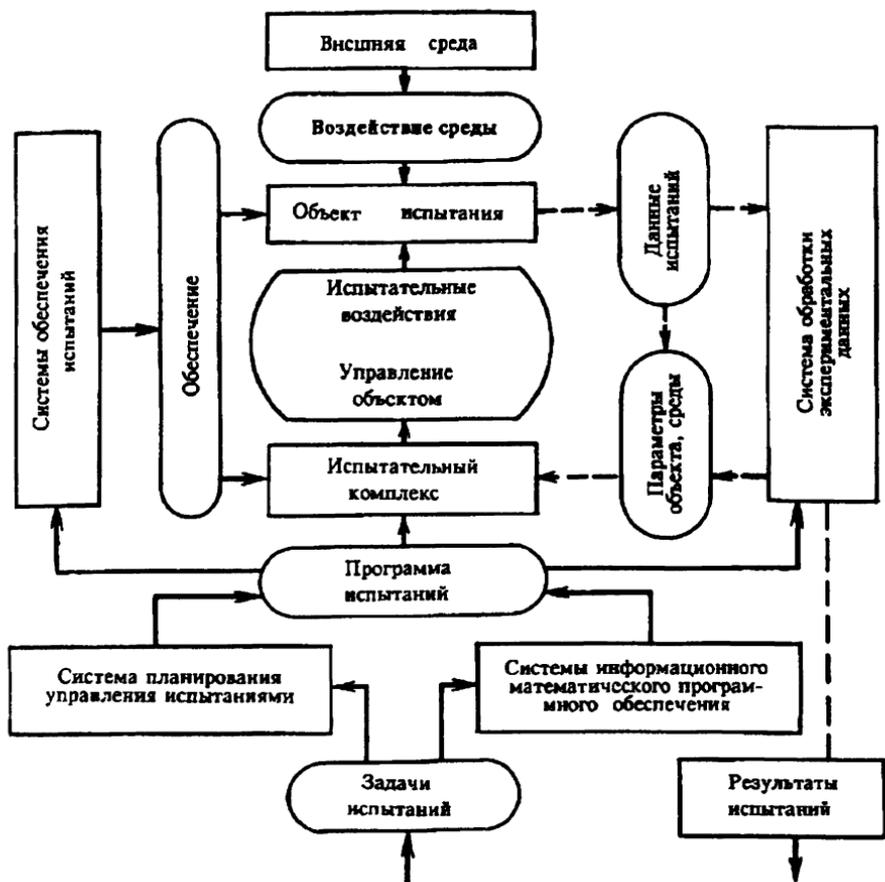


Рис. 4.1. Обобщенная структура системы испытаний

Испытательный комплекс (испытательный стенд) обеспечивает непосредственную реализацию процесса испытаний.

К его основным функциям относятся:

— формирование, имитация реальных воздействий и условий эксплуатации;

— измерение параметров и характеристик объекта испытаний и внешней среды;

— сбор, передача, хранение, обработка, отображение и регистрация информации о ходе процесса испытаний;

— управление, контроль, диагностика и прогнозирование состояния средств испытаний и объекта испытаний.

Система планирования и программирования испытаний осуществляет:

— разработку целей, критериев оценки и требований к испытателям и их обеспечению;

— определение видов испытаний, способов их организации и необходимых для этого технических средств, ресурсов и исполнителей;

— определение состава и форм представления промежуточных и итоговых результатов испытаний, состава и диапазонов изменения испытательных и управляющих воздействий, видов и порядка формирования и исполнения решений по управлению испытаниями;

— разработку планов, программ, законов управления (алгоритмов управления, функционирования, сбора и обработки информации) и другой нормативно-справочной и технологической документации.

Система обеспечения испытаний включает штатные из состава КЛА и специальные дополнительные технические средства энергообеспечения, подъемно-транспортное оборудование, системы заправки компонентами топлива, сжатыми газами, системы водоснабжения, канализации, термостатирования, жизнеобеспечения обслуживающего персонала, связи, технического обслуживания и ремонта, пожаротушения, системы радиолокации и траекторных измерений, спасательные и др.

Система обработки экспериментальных данных осуществляет:

— сбор и накопление экспериментальных данных в ходе испытаний;

— экспресс-обработку экспериментальных данных в реальном масштабе времени для принятия решений по оценке хода испытаний и управлению работой технических и программных средств СИ;

— полную обработку, систематизацию, оценку и анализ экспериментальных данных;

— длительное хранение испытательной информации и создание банков данных для последующих испытаний;

— разработку отчетных материалов и документов, подготовку машинных и человекочитаемых носителей экспериментальной информации для использования во внешних системах.

Система организационного обеспечения определяет основные

задачи СИ и функциональные обязанности и права персонала и структурных подразделений по управлению, обеспечению функционирования, техническому обслуживанию и ремонту системы.

Система информационного обеспечения СИ предназначена для формирования, хранения, систематизации, поиска и представления персоналу СИ в удобной для использования форме справочной, нормативной и научно-технической информации, данных о ранее выполненных испытаниях, описаний стандартных, типовых решений и технологических процедур.

Система математического обеспечения СИ реализует одну из основных задач автоматизации — создание, развитие и использование математической базы формализации технологических и управленческих процессов в СИ как основы машинной реализации процедур сбора и обработки информации, планирования и управления испытаниями, выполнения технологических операций.

Программное обеспечение делится на общесистемное и специальное.

Общесистемное программное обеспечение (операционная система) предназначено для планирования и организации процесса обработки, ввода-вывода, управления данными, распределения ресурсов, подготовки и отладки программ и других вспомогательных операций обслуживания.

Прикладное (специальное) программное обеспечение включает конкретные программы задач управления и обработки информации при функционировании СИ.

Анализ процесса испытаний позволяет выделить следующие основные направления его автоматизации:

— автоматизация технологических процессов, связанных с формированием, имитацией реальных воздействий, условий эксплуатации или функционирования объектов испытаний;

— автоматизация технологических процессов подготовки и обеспечения функционирования объектов испытаний;

— автоматизация контроля, управления, диагностики и настройки технических средств испытаний;

— автоматизация вспомогательных и обеспечивающих процессов;

— автоматизация организационного планирования и управления;

— автоматизация сбора и обработки экспериментальных данных;

— автоматизация разработки, совершенствования и развития технических средств испытаний, управления и обработки информации и их математического и программного обеспечения.

Объем и уровень автоматизации, выбор технических средств и методов автоматизации зависят от типа, задач и масштабов СИ и конкретных условий ее применения и эксплуатации. Их многообразие не позволяет рассмотреть все возможные варианты и даже типы таких систем.

Вместе с тем все они предполагают реализацию целого ряда *хотя* и отличающихся по объему и характеристикам, но однотипных по своей сущности, теоретическим основам, средствам и методам воплощения отдельных подпроцессов. Интеграция этих подпроцессов в определенных соотношениях применительно к конкретным задачам, требованиям, условиям и ресурсным возможностям обеспечивает формирование необходимой системы с требуемыми характеристиками. К числу таких основополагающих подпроцессов следует отнести:

- имитацию определенных видов реальных воздействий — тепло-вакуумных, климатических и т.п.;

- измерение параметров технологических процессов и технических систем;

- сбор и передачу информации;

- вычислительные процессы и обработку информации с помощью ЭВМ;

- взаимодействие человека с машиной;

- управление работой технических средств и регулирование параметров процессов и систем;

- контроль, диагностику и прогнозирование технического состояния;

- моделирование процессов и систем;

- сбор и обработку экспериментальных данных;

- оценку технико-экономических и иного вида показателей эффективности процессов и систем.

Нетрудно видеть, что приведенный перечень содержит подпроцессы, характерные практически для любой сферы разработки, производства и эксплуатации производственных, научно-исследовательских и других процессов и систем.

Вместе с тем специфика каждого вида деятельности и конкретных условий реализации перечисленных подпроцессов обуславливает особенности их автоматизации, выбора технических средств и обоснования состава и уровня требований к ним.

В сфере экспериментальной отработки комплексов ЛА и их элементов к числу таких специфических особенностей относятся:

- высокая степень неопределенности возможных состояний объекта испытаний, состава и диапазонов изменения параметров и управляющих воздействий как при подготовке к испытаниям, так и в процессе их проведения;

- большой объем экспериментальных данных и разнообразие целей и методов их обработки;

- широкая номенклатура испытываемых объектов различного принципа действия и назначения и соответствующих им условий испытаний и конкретных экспериментов;

- необходимость использования одной и той же эксперименталь-

ной базы для различных объектов и различных программ испытаний;
— сложность, а порой и невозможность экспериментальной проверки некоторых алгоритмов и режимов работы объектов или отдельных систем или их элементов;

— эволюционный характер развития сложных испытательных комплексов на основе совершенствования характеристик их отдельных элементов;

— значительная сложность и территориальная разобщенность средств отдельных видов испытаний (например, летных);

— тяжесть последствий аварийных ситуаций и других нарушений программы испытаний для персонала, экспериментальной базы и окружающей среды.

В результате автоматизации СИ должны быть обеспечены:

1. Полнота, достоверность, точность экспериментальных данных.
2. Надежность функционирования технических средств испытаний.
3. Способность СИ адаптироваться к изменению задач и условий испытаний, составу и видам экспериментальных данных, видам и параметрам контролируемых и управляемых воздействий, методам обработки и представления информации.

4. Требуемое быстродействие.

5. Универсальность СИ по отношению к видам и объектам испытаний.

6. Рациональное использование вычислительной, микропроцессорной техники и робототехники.

7. Удобство общения человека с машиной.

8. Защищенность информации.

9. Безопасность СИ, в частности экологическая.

10. Оптимальные габаритные, массовые и энергетические характеристики элементов СИ, особенно бортовых испытательных устройств.

11. Простота технического обслуживания и ремонтпригодность СИ.

12. Высокий уровень квалификации обслуживающего персонала.

13. Экономичность СИ.

4.1.2.

Обобщенная модель испытаний

Испытания можно рассматривать как специфический процесс управления, имеющий целью исследование свойств и характеристик объекта испытаний путем целенаправленного воздействия на него и оценки реакций объекта на эти воздействия (рис. 4.2).

Для СИ входом является программа (задачи) испытаний, выходом — результаты испытаний. Программа испытаний трансформируется в определенную последовательность операций управления и регулирования процесса испытаний, контроля его хода и соответствия программе, диагностики причин отклонения параметров процесса от заданной нормы, а также процедур обработки получаемых данных.

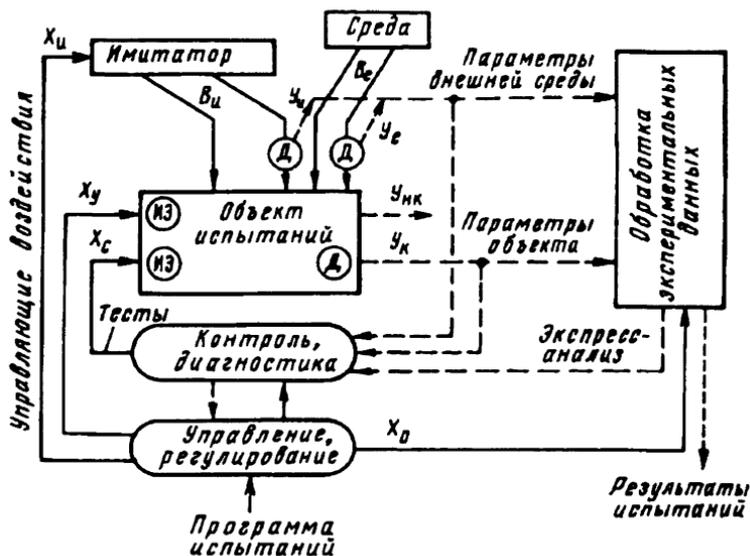


Рис. 4.2. Функциональная схема процесса испытаний

В процессе испытаний объект испытаний подвергается воздействию со стороны системы управления и регулирования X_y , системы контроля и диагностики X_c , а также со стороны среды испытаний, порождаемой искусственными V_n и естественными V_e воздействиями. Реакция объекта Y является входом систем управления и регулирования, контроля и диагностики, а также обработки экспериментальных данных.

Управляющие воздействия X_y обеспечивают изменение состояний объекта испытаний в соответствии с алгоритмами функционирования (реализации рабочих режимов) или положения в процессе испытаний и воспринимаются исполнительными элементами (ИЭ) объекта. Воздействия X_c (тестовые, стимулирующие) имеют своей целью имитацию рабочих или реализацию особых (контрольных) режимов функци-

онирования, поведения объекта испытаний с целью детализации или определения его состояния. Информация о контролируемой реакции объекта испытаний Y_k формируется датчиками D объекта испытаний, а также системой обработки данных в виде результатов экспресс-анализа данных, выполняемого в реальном времени хода испытаний. Среда испытаний представляет собой самостоятельный объект управления, выходы которого B_n, B_c являются входами объекта испытаний, а их контролируемая часть Y_n, Y_e , формируемая датчиками параметров среды, поступает на входы систем контроля и обработки данных.

Активное управление средой испытания обеспечивается воздействиями X_n , управляющими имитаторами реальных воздействий (стендами, установками). Пассивное (опосредствованное) управление средой реализуется через изменение положения или режимов работы объекта под влиянием управляющих воздействий X_y .

Имитаторы воздействий и система обработки данных также являются объектами контроля и управления в ходе испытаний. Управление их состоянием осуществляется централизованно по воздействиям X_n, X_c , а также собственными, местными средствами управления и контроля (на схеме они не обозначены).

Таким образом, управление процессом испытаний представляет собой совокупность одновременно протекающих подпроцессов, образующих различные по своим целям, но идентичные по информационному содержанию контуры управления и контроля. К ним относятся управления объектом, средой, средствами испытаний (имитатором), обработкой данных и другими процессами и объектами, не показанными на схеме.

Структура связей обобщенной модели СИ отражает множество различных типов испытаний и соответствующих им систем.

Так, например, при $X_y = X_c = X_n = 0$ отсутствуют управляемые воздействия на объект и имеют место пассивное испытание и контроль в естественных условиях эксплуатации при нефункционирующем объекте. При $X_c = 0$ имеют место активное испытание и пассивный контроль функционирующего объекта в условиях искусственных и естественных внешних воздействий.

Каждый из контуров управления, в свою очередь, может содержать в своем составе более простые процессы сбора и передачи данных, измерения, оценки состояния объектов управления, принятия решений, формирования и передачи управляющих воздействий, отображения, регистрации и хранения информации, вычислений, моделирования и др.

Состав и возможности информационных процессов в каждом контуре управления варьируются в широких пределах. Манипулируя этими параметрами, можно получить различные по свойствам и характеристикам контуры управления, комбинации структур которых, в свою

очередь, позволяют строить различные по характеристикам и конфигурации СИ.

Таким образом, СИ, по существу, является информационной системой контроля и управления, отличающейся от других подобных систем некоторой спецификой объектов управления, а также степенью определенности и объемом контролируемых данных.

Многообразие наименований СИ: контрольно-испытательные системы, информационно-измерительные и управляющие вычислительные системы и комплексы и т.п. — отражает лишь их целевую направленность либо превалирующую роль того или иного информационного процесса.

4.2.

Источники и носители информации в системах испытаний

4.2.1.

Основные понятия и определения

Испытания представляют собой сложный комплекс процессов, связанных с использованием, получением и преобразованием вещества, энергии и информации.

Однако независимо от содержания и конкретного назначения их конечной целью является получение необходимых сведений об объекте испытаний, его функциональных возможностях, технико-экономических и другого типа характеристиках, рациональности принятых проектно-конструкторских, технологических и эксплуатационных решений.

Подобного рода сведения о событиях и явлениях материального мира принято называть информацией.

Таким образом, продуктом системы испытаний является информация, а сами испытания можно рассматривать как своеобразный технологический процесс получения необходимой информации об объекте испытаний.

Понятие «информация» является многогранным. Информацию можно рассматривать с точки зрения ее содержательности, объективности, форм представления, способов измерения, преобразования и др.

В практическом понимании информация есть сведения, являющиеся объектом восприятия, хранения, передачи, преобразования, обработки, отображения и т.п.

В философском смысле информация есть отображение реального мира, характеристика такого всеобщего свойства материи, как разнообразие, проявляющееся только при взаимодействии объектов (процессов).

В техническом плане существенно свойство информации проявляться в различных материально-энергетических и абстрактных (знаковых) формах, реализуемых техническими средствами и персоналом конкретной информационной системы на различных этапах обращения информации в системе.

Информационную модель системы испытаний целесообразно представить в виде трех подсистем: 1) формирования первичной испытательной информации; 2) сбора и обработки экспериментальных данных; 3) управления.

Подсистема формирования первичной информации обеспечивает создание испытательной среды — совокупности естественных и искусственных факторов (температуры, давления, вибрации, излучения и т.п.), имитирующих условия эксплуатации объекта, и управляющих воздействий, задающих требуемые режимы работы, состояния, положения объекта испытаний и т.п.

Целенаправленное взаимодействие объекта испытаний с испытательной средой порождает информацию об объекте испытаний в данных условиях. Условимся называть такую информацию первичной испытательной информацией (ПИИ). ПИИ проявляется в виде параметров реакции (выхода) самого объекта испытаний и сопутствующих ей физических явлений и событий. Она представляет собой объективную субстанцию, зависящую только от свойств объекта испытаний, среды и управляющих воздействий и не зависящую от восприятия испытателя или технических средств системы испытаний. Состав ПИИ и формы ее проявления зачастую бывают неизвестны. ПИИ включает также сведения об испытательной среде.

Подсистема сбора и обработки экспериментальных данных реализует подпроцессы восприятия, подготовки, передачи и обработки информации.

Данными называется информация, представленная в формализованном виде, обеспечивающем хранение, передачу, обработку и отображение информации с помощью технических средств. Данные могут быть также приспособлены для восприятия человеком.

В общем случае восприятие заключается в целенаправленном извлечении и анализе информации о каком-либо объекте (процессе). В системе испытаний подпроцесс восприятия обеспечивает формирование первичных экспериментальных данных (ПЭД) — первичной испы-

тательной информации, зафиксированной (воспринятой) техническими средствами или испытателем. Очевидно, что ПЭД отражают только часть ПИИ. Состав ПЭД определяется целями конкретных экспериментов, возможностями технических средств восприятия (датчиков). Определение состава ПЭД является сложной и важной проблемой организации испытаний. Степень соответствия ПИИ и экспериментальных данных зависит от качества технических средств и методики реализации восприятия и других подпроцессов обработки экспериментальных данных. На основе ПЭД, отражающих отдельные свойства или параметры объекта, могут быть получены при обработке сведения о других свойствах или параметрах вторичные экспериментальные данные.

Подготовка данных обеспечивает взаимодействие различных технических устройств между собой и с операторами системы, защиту данных от искажения, их систематизацию и требуемое распределение между потребителями. Подготовка включает различные виды преобразований, кодирования, измерения и идентификации информации и ее носителей.

Смысл подпроцессов передачи и хранения данных достаточно понятен из их наименования. При передаче на расстояние используются каналы различной физической природы. Извлечение носителей (сигналов) данных на выходе канала, подверженного действию помех, носит характер вторичного восприятия.

Обработка экспериментальных данных включает несколько этапов, связанных с контролем и обеспечением качества исходных данных, их статистической обработкой, систематизацией, установлением физических и функциональных закономерностей и свойств объекта испытаний. Этот процесс является исключительно сложным из-за необходимости установления целой цепочки прямых и обратных соответствий между воздействиями, свойствами объекта и его реакцией, ПИИ и ПЭД, ПЭД и результатами их промежуточных преобразований и т.п. Важность этого подпроцесса определяется серьезностью последствий получения ошибочных результатов испытаний.

Подсистема управления осуществляет сбор данных о параметрах объектов управления (объекта испытаний, испытательных устройств, испытательной среды, средств сбора и обработки экспериментальных данных), контроль соответствия текущих состояний объектов управления требуемым, принятие решений и формирование управляющих воздействий по поддержанию заданных условий и режимов испытаний, состояний и значений параметров технических средств системы. Кроме того, в процессе управления реализуются функции планирования, регулирования параметров технической диагностики, прогнозирования и оценки хода испытаний и качества их результатов.

Входом подсистемы управления являются программы или задачи

испытаний. В последнем случае программа испытаний разрабатывается. Подсистема управления может иметь самостоятельный тракт сбора данных об объектах управления или использовать технические средства подсистемы сбора и обработки экспериментальных данных.

Информация, используемая при управлении, называется управленческой, с указанием, в случае необходимости, ее функциональной принадлежности (контрольная, диагностическая, прогнозная, плановая).

Независимо от своего содержания, места формирования и использования, данные обладают выраженными в понятиях информативности, полноты, достоверности и оперативности полезными свойствами и характеризуются формой представления, носителем, объемом и другими качественными и количественными показателями.

Информативность данных характеризует их способность содержать необходимые полезные сведения, пригодные для принятия решения, распознавания состояний системы, определения значений исследуемой величины или свойств объекта испытаний.

Полнота данных характеризует степень информативности данных в смысле количества и разносторонности содержащихся в них полезных сведений.

Достоверность данных — это степень соответствия выходных и входных данных некоторого тракта передачи или преобразования информации.

Оперативность данных характеризует скорость и своевременность их представления.

Форма представления данных — это совокупность способов представления информационных признаков данных и правил их идентификации. Она зависит от вида источника, потребителя или носителя данных и, в свою очередь, предопределяет состав и вид технических средств ввода, вывода, измерения, передачи, хранения и обработки данных. Основные из них приведены в табл. 4.1.

Источниками информации являются испытатели, операторы системы или автоматические устройства — датчики, измерительные устройства, ЭВМ и т.п. Источники выдают информацию в непрерывной или дискретной форме. От операторов она поступает в речевой, текстовой форме или в виде биоэлектрических сигналов. Автоматические устройства поставляют информацию в текстовой и графической форме, в кодах или в виде сигналов.

На выходе системы информацию представляют в форме, необходимой и удобной для ее последующего использования. Операторам информация предоставляется в звуковой, речевой, текстовой и графической формах. Во внешние системы информация поступает в кодах, текстовой и графической форме непосредственно, а также на машинных носителях информации — перфолентах, перфокартах, магнитных лентах, дисках.

ДАННЫЕ И СРЕДСТВА ИХ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ

Источники информации	Форма представления, носители информации	Средства ввода информации	Средства измерения, преобразования, передачи, обработки, хранения	Средства вывода, отображения, регистрации информации
<p>Человек, документы</p> <p>Датчики первичной информации, ЭВМ</p>	<p>Речевая Текстовая Графическая Биоэлектрические сигналы Электрические сигналы органов управления Человекочитаемые носители: осциллограммы, графики, тексты, фото-, киноизображения Измерительные сигналы Цифровые коды Физические параметры</p>	<p>Преобразователи звука Пишущие машинки Считывающие устройства Биоэлектрические преобразователи Преобразователи электрических сигналов Кодирующие устройства Клавиатура органов управления Терминалы Дисплеи Измерительные преобразователи Аналого-цифровые преобразователи Преобразователи неэлектрических сигналов в электрические</p>	<p>Цифровые, аналоговые измерительные устройства Кодирующие, декодирующие устройства Модуляторы, демодуляторы Коммутаторы и распределители сигналов Каналы связи и передачи данных, интерфейсы Телемеханические устройства Процессоры, ЭВМ Запоминающие устройства</p>	<p>Печатающие устройства Графопостроители Преобразователи код — речь Индикаторы Средства отображения Средства сигнализаторы Цифро-аналоговые преобразователи Запоминающие устройства Дисплеи, мониторы Средства дистанционной передачи данных Исполнительные устройства</p>
<p>Устройства обработки, передачи информации</p>	<p>Звуковая сигнализация Индикация Видеоизображения Текстовая Графическая Машинные носители: перфокарты, магнитные ленты, диски, фото- киноленты</p>	<p>Автоматические пишущие машинки Устройства считывания Устройства цифрового ввода Дисплеи, терминалы</p>		

4.2.2. Носители информации в автоматических устройствах

В автоматических устройствах и системах физическим носителем данных является сигнал.

Сигналом называется изменяющаяся во времени физическая величина, описываемая функцией времени. Один или несколько параметров этой функции (сигнала) содержит информационные признаки данных или информацию о другой физической величине. Такой параметр называется информационным параметром. Совокупность сигналов и их информативных параметров образует сообщение. В качестве сообщения могут рассматриваться также печатные тексты, графические изображения, кодовые комбинации и т.п.

В общем случае сообщение представляет собой упорядоченный и целостный по каким-либо признакам квант (порцию) данных.

Сигнал, знак текста, символ (разряд) кодовой комбинации образуют элемент сообщения.

Сообщение помимо смысловой, информационной части может содержать служебную часть. В ее состав могут входить признаки начала или конца сообщений, его типа, источника или получателя сообщения и др.

В современных системах наибольшее распространение получили электрические сигналы в виде потенциалов постоянного тока, гармонических колебаний или импульсных последовательностей. В качестве информативных параметров J могут быть использованы амплитуда тока или напряжения, частота колебаний или частота следования импульсов, фаза, временные интервалы длительности сигнала, периода следования, сдвига и т.п.

Информативный параметр сигнала может изменяться во времени и по величине непрерывно или дискретно. В зависимости от этого различают аналоговые (непрерывные), непрерывно-дискретные, дискретно-непрерывные и дискретно-квантованные сигналы.

Информативный параметр J аналогового сигнала внутри заданного интервала $[J_{\min}, J_{\max}]$ может принимать любое из бесконечного множества значений. У дискретного сигнала информативный параметр может принимать только конечное множество значений внутри этого интервала. Дискретные сигналы, значения информативных параметров которых соответствуют заданные числа в определенной системе счисления, называют цифровыми сигналами. Если параметр принимает только два значения (например, 0 или 1), то такой сигнал называют цифровым двоичным или просто двоичным сигналом.

4.2.3.

Модуляция и дискретизация сигналов

Выбор переносчика информации и его информативных параметров представляет важную проблему построения любой информационной системы, в том числе и автоматизированной. Ее решение связано с необходимостью удовлетворения целого ряда зачастую противоречивых требований по достоверности, скорости, дальности передачи данных, точности измерений и метрологической совместимости оборудования, удобству хранения, регистрации и обработки данных и другим функциональным и эксплуатационным характеристикам.

В общем случае ни один из видов информативных сигналов не обладает абсолютным преимуществом перед другими при реализации различных информационных операций, процедур и в различных условиях конкретных систем.

Так, например, аналоговые сигналы датчиков первичных экспериментальных данных чувствительны к помехам, не обеспечивают эффективного использования линий связи. Они могут передаваться на небольшие расстояния, а их непосредственная обработка в ЭВМ невозможна. Цифровые сигналы не имеют этих недостатков, однако их формирование некоторыми источниками либо невозможно, либо требует сложного оборудования.

Поэтому, как правило, в информационных системах используется не один, а несколько видов носителей информации, наиболее эффективных для тех или иных процедур. В связи с этим возникает и задача прямого и обратного, зачастую неоднократного, преобразования одного вида сигнала или его информативного параметра в другие.

Одним из способов преобразования сигналов является модуляция.

Модуляцией называется процесс установления соответствия между информационными признаками данных и параметрами сигнала или между параметрами различных сигналов. В соответствии с тем, какая величина является первичной или вторичной при модуляции, различают модулирующие или модулируемые сигналы (признаки, параметры). В технике связи модулируемые колебательные сигналы называются несущими сигналами или несущей частотой.

Выбор вида модуляции влияет на энергетические затраты при передаче информации, ее защищенность от воздействия помех, сложность аппаратуры передачи данных.

Вид модуляции определяется видом модулируемого сигнала и его информативного параметра.

В современных системах для передачи информации чаще всего используются гармонические колебания и импульсные последователь-

ности, а для их модуляции, соответственно, методы амплитудной, частотной, фазовой и амплитудно-импульсной, частотно-импульсной, фазо-импульсной, широтно-импульсной модуляции.

Если в качестве модулируемого сигнала используются гармонические колебания $a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ с максимальной амплитудой A_0 , круговой частотой ω_0 и начальной фазой φ_0 , то после модуляции функцией $x(t)$ их амплитуды, частоты или фазы результирующий сигнал, соответственно, будет иметь вид

$$a(t) = A_0 [1 + x(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) ;$$

$$a(t) = A_0 \cos[\omega_0 (1 + x(t))t + \varphi_0] ;$$

$$a(t) = A_0 \cos[\omega_0 t + \varphi_0 (1 + x(t))] .$$

Модулирующая функция $x(t)$ может быть непрерывной, дискретно-непрерывной, непрерывно-дискретной или дискретно-квантованной.

Модуляция импульсных последовательностей может осуществляться путем изменения их амплитуды A_0 , периода повторения t_n , частоты импульсов $f = 1/t_n$, длительности импульса τ , скважности $Q = t_n/\tau$, фазы $\varphi = 2\pi t_3/t_n$ (где t_3 — задержка фронта импульса относительно опорной последовательности) либо числа импульсов N за фиксированный промежуток времени T .

При частотно-импульсной модуляции обычно остается неизменным один из параметров (Q или τ), а второй параметр изменяется. При широтно-импульсной модуляции может изменяться положение либо одного из фронтов импульса (односторонняя модуляция), либо двух сразу (двусторонняя модуляция).

В случае, когда модулирующая функция является двоичной, модуляция может фиксировать каждое из значений 0 или 1, либо смену каждого из этих значений ($0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$), либо смену одного из них ($0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$ и $0 \rightarrow 0$).

Для импульсных сигналов характерен и такой вид модуляции, как кодо-импульсная модуляция. Она заключается в том, что каждому из заранее установленных значений информативного параметра модулирующего сигнала (признака, символа данных) ставится в соответствие последовательность импульсов, совокупность информационных признаков которых образует определенную кодовую комбинацию.

Устройство, осуществляющее модуляцию, называется модулятором.

Обработка модулированных сигналов может потребовать восстановления (выделения) исходного (модулирующего) сигнала или информационного признака данных. Этот процесс называется демодуля-

цией. Демодуляция не сводится к простому обратному преобразованию. Из-за воздействия помех и нарушения синхронности процессов модуляции и демодуляции определение значений информативных признаков переносчика информации и восстановление исходного сигнала связано с принятием решений на основе теории распознавания образов.

Демодуляция осуществляется демодулятором. Иногда функции модуляции и демодуляции выполняются одним устройством, которое в этом случае называется модемом.

Важной характеристикой сигнала — переносчика информации является его частотный спектр. Каждый сигнал может быть представлен в виде объединения некоторой совокупности простых гармонических колебаний (гармоник) различной частоты. Диапазон частот гармоник сигнала образует его спектр. Чем сложнее форма сигнала и чем меньше его длительность, тем шире спектр. При передаче сообщений спектр сигнала должен быть согласован с полосой пропускания канала связи. Посредством модуляции спектр сигнала может быть смещен по оси частот, что позволяет использовать одну линию (канал) связи для одновременной передачи нескольких сигналов.

4.2.4.

Преобразование аналоговых сигналов

Использование аналоговых сигналов для передачи информации вызывает наибольшие трудности из-за их чувствительности к воздействию помех, сложности аппаратуры модуляции и демодуляции, устройств хранения и обработки данных, нерационального использования оборудования и каналов передачи данных. Кроме того, они обладают определенной избыточностью, что также приводит к излишней загрузке систем передачи и обработки данных.

В связи с этим возникает задача замены непрерывной функции времени $x(t)$ информативного параметра ее дискретными значениями как по времени — $x(t_1), x(t_2), x(t_3), \dots$, так и по величине — $x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots$.

Первый вид представления связан с установлением определенной частоты опроса (измерения) $x(t)$ в моменты времени t_1, t_2, t_3, \dots и называется дискретизацией аналоговой величины $x(t)$ по времени. Второй вид представления связан с заменой бесконечного множества значений $x(t)$ на интервале $[x_{\min}, x_{\max}]$ ограниченным (счетным) множеством значений $x_{\min}, x_1, x_2, \dots, x_{\max}$ и называется дискретизацией по

уровню или квантованием аналоговой величины $x(t)$. Теоретическое обоснование дискретизации по времени дает теорема Котельникова. Согласно этой теореме непрерывная функция $x(t)$, имеющая спектр $x(f)$, ограниченный полосой частот $W = f_{\max} - f_{\min}$, может быть представлена с помощью дискретных отсчетов, взятых через интервалы времени Δt , равные $1/2W$.

На интервале времени наблюдения T эта функция может быть представлена с помощью n отсчетов, число которых равно $2WT$. Функция времени $x(t)$ и ее спектр $x(f)$, ограниченный граничными частотами f_{\min} и f_{\max} , изображены на рис. 4.3. Теорема Котельникова устанавливает также правила воспроизведения аналогового сигнала по его отсчетам $x(k/2W)$.

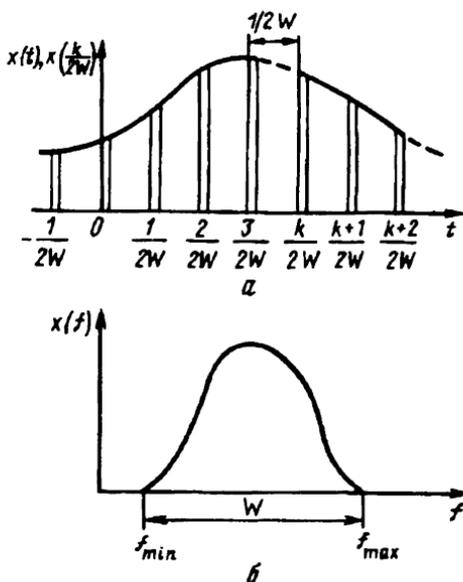


Рис. 4.3. Схема дискретизации непрерывного сигнала:
 а - отсчеты функции;
 б - спектр сигнала

В тех случаях, когда задача заключается не в последующем восстановлении сигнала, а лишь в фиксации его наличия, период опроса Δt не должен превышать половины интервала времени, равного длительности сигнала τ , т.е. $\Delta t \leq \tau/2$.

Физический смысл приведенной теоремы заключается в том, что при $\Delta t \ll 1/2W$ увеличивается вероятность предвидения значения последующего отсчета, если известен данный отсчет. В пределе — при $\Delta t \rightarrow 0$ значение последующего отсчета становится известным заранее. Другими словами, такое сообщение не несет никакой информации, а

следовательно, оно избыточно. С увеличением Δt информативность сообщения увеличивается, но одновременно увеличиваются искажения восстановленного сигнала.

Величина требуемого периода или частоты опроса имеет важное значение для организации сбора первичных экспериментальных данных и определения быстродействия коммутационных, измерительных устройств и средств обработки информации.

Квантование непрерывных сигналов связано с проблемой измерения и точности численного представления аналоговых величин.

Квантование заключается в разбиении множества значений информативного параметра сигнала $x = [x_{\min}, x_{\max}]$ на m примыкающих друг к другу интервалов Δx_i с последующим отождествлением текущих значений сигнала $x(t)$ с одним из таких интервалов (рис. 4.4).

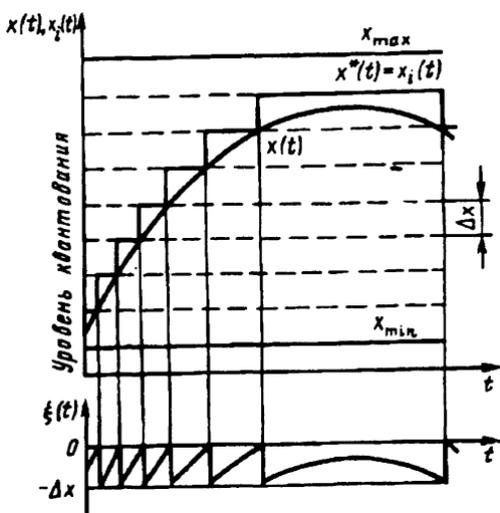


Рис. 4.4. Схема квантования

Каждый из интервалов Δx_i ограничен минимальным x_{i-1} и максимальным x_i уровнем $x \in \Delta x_i$: $x_i = \sum_{i=1}^i \Delta x_i + x_{\min}$.

Граничные значения интервалов Δx_i называются уровнями квантования, а величина интервала — порогом или шагом квантования. Обычно порог квантования выбирается одинаковым для всех m интервалов

$\Delta x_i = \Delta x$, а $x_{\min} = 0$. Тогда значения уровней квантования x_i определяются соотношением $x_i = \Delta x i$. В зависимости от типа устройства идентификации (определения принадлежности $x(t)$ к Δx_i) текущее значение $x(t)$ отождествляется с граничными значениями i -го интервала x_{i-1} или x_i либо с их средним значением $x_{i\text{cp}} = (x_{i-1} + x_i) / 2$. Отождествляемое значение условимся обозначать x_i^* .

Очевидно, что при квантовании центральным вопросом является выбор порога квантования Δx . От этого, собственно, зависят точность представления (измерения) непрерывной величины, сложность ее формализованного описания и информативность квантованного сигнала $x_i(t)$. Строгого математического обоснования такого выбора нет.

В реальных условиях Δx является конечной величиной, значение которой определяется в соответствии с конкретными константами. Эти потребности обусловлены наличием определенных ограничений в отношении воспроизведения полученных сигналов, точности обработки данных, заданных уровней достоверности и степени детализации результатов обработки. Примерами ограничений могут служить зона нечувствительности измерительного прибора, разрешающая способность средств отображения или разрядность устройств памяти, ограниченность числа решений, принимаемых по данному сигналу.

Таким образом, с каждым потребителем информации связан свой предел точности, к которому необходимо стремиться, но превышать который не имеет смысла, поскольку два сигнала, отличающиеся (в определенном смысле) на величину, не большую некоторой константы, характеризующей данного потребителя, не будут им различаться.

По-видимому, целесообразно говорить о необходимом минимуме информативности для того, чтобы квантованный сигнал $x_i^*(t)$ воспроизводил сигнал $x(t)$ с некоторой погрешностью, не превышающей заданной величины $\xi_{\text{зад}}$.

Замена $x(t)$ на $x_i^*(t)$ приводит к ошибке квантования $\xi(t) = x_i^*(t) - x(t)$, называемой также шумом квантования. Ошибка квантования должна удовлетворять условию $\xi(t)_{\text{max}} \leq \xi_{\text{зад}}$ или $M[\xi(t)] \leq \xi_{\text{зад}}$.

Пример квантования с постоянным шагом, а также функции сигналов $x(t)$, $x_i^*(t)$ и шума квантования $\xi(t)$ показаны на рис. 4.4. За меру близости двух сигналов, непрерывного и квантованного, можно взять среднюю мощность шума квантования

$$P = M[\xi^2(t)] \leq \xi_{\text{зад}}^2.$$

При достаточно малом шаге квантования $(x_{\max} - x_{\min}) \gg \Delta x$ независимо от закона распределения $x(t)$ ошибка квантования $\xi(t)$ имеет равномерное распределение.

В этом случае оптимальным значением уровня квантования является $x_i^* = x_{\text{ср}i}$. При этом максимальное значение ошибки квантования $\xi_{\max}(t) = \Delta x/2$, а ее математическое ожидание равно нулю: $M[\xi(t)] = 0$.

Если $x_i^* = x_i$ или $x_i^* = x_{i-1}$, то $\xi_{\max}(t) = \Delta x$, $M[\xi(t)] = \Delta x/2$.

Мощность шума, равная его дисперсии, во всех случаях равна $(\Delta x)^2/12$.

В реальных устройствах чаще всего квантуемая величина отождествляется с наибольшим или наименьшим значением соответствующего интервала Δx_i .

4.2.5.

Кодирование сообщений

Для обеспечения удобства восприятия, записи, воспроизведения, обработки, качественной и количественной оценки информации и защиты ее от искажений применяются формализованные языки описания, правила установления соответствия и преобразования информативных признаков сигналов и сообщений.

При этом сообщение на входах и выходах элементов информационной системы рассматривается как слово некоторого формального алфавита, содержащего в своем составе определенное число символов букв, знаков, элементов сообщения и т.п. Процесс формализованного описания информационных сообщений и установления соответствия между буквами, символами, признаками различных алфавитов получил наименование кодирования сообщений, а правила, по которым осуществляется описание и устанавливается соответствие, стали называть кодами.

Расширенное понимание кодирования включает любые формы соответствия сообщений и их элементов как на формальном (абстрактном), так и на физическом уровнях. Поэтому рассмотренные ранее методы модуляции и квантования также являются частными случаями кодирования на уровне информативных параметров физических носителей информации.

Наиболее простые правила кодирования заключаются в сопоставлении каждому символу алфавита $X = \{x_1, x_2, \dots, x_s\}$ слова конечной длины в алфавите $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. Код может быть задан в форме таблицы, графа, аналитического выражения.

Например, символы алфавита X можно закодировать словами из двух символов алфавита Y по правилу:

$$X : x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots;$$

$$Y : y_1 y_2, y_2 y_3, y_3 y_4, \dots, y_i y_{i+1}, \dots$$

В табл. 4.2 приведены результаты кодирования десятичных чисел различными кодами.

Т а б л и ц а 4.2

КОДИРОВАНИЕ ДЕСЯТИЧНЫХ ЧИСЕЛ

Число	Двоичный натуральный код	Код Грея	Двоично-десятичный код	Шестнадцатерич- ный код
0	0000	0000	0000 0000	0000
1	0001	0001	0000 0001	0001
2	0010	0011	0000 0010	0002
3	0011	0010	0000 0011	0003
4	0100	0110	0000 0100	0004
5	0101	0111	0000 0101	0005
6	0110	0101	0000 0110	0006
7	0111	0100	0000 0111	0007
8	1000	1100	0000 1000	0008
9	1001	1101	0000 1001	0009
10	1010	1111	0001 0000	000A
11	1011	1110	0001 0001	000B
12	1100	1010	0001 0010	000C
13	1101	1011	0001 0011	000D
14	1110	1001	0001 0100	000E
15	1111	1000	0001 0101	000F

Слова, сопоставленные элементам (словам) множества X , в алфавите Y называются кодовыми словами или кодовыми комбинациями.

Основные характеристики кода:

— основание кода α , равное числу отличающихся друг от друга символов в алфавите. Так, например, десятичные коды имеют десять символов: $0, 1, \dots, 9$; двоичные (бинарные) — два: 0 и 1 .

— длина кодовой комбинации n_j , называемая также разрядностью (значностью) кода или длиной слова. Разрядность равна числу одинаковых или отличающихся друг от друга символов в кодовой комбинации. Код называется равномерным, если все кодовые комбинации одинаковы по длине ($n_j = n$), и неравномерным, если величина n_j в кодовых комбинациях непостоянна;

— число кодовых комбинаций N_p в коде (мощность кода), каждая из которых используется для передачи своего отдельного сообщения. Общее число возможных кодовых комбинаций кода $N = \alpha^n$. Код называется полным, если $N_p = N$. Так, например, число всевозможных кодовых комбинаций двоичного кода равно 2^n ;

— способ передачи, определяющий порядок передачи кодовой комбинации. Если все символы кодовой комбинации передаются одновременно (за один такт), то код называется параллельным, если последовательно (за n_j тактов), то он называется последовательным. Для передачи последовательного кода обычно требуется одна линия связи или канал связи, для передачи параллельного — n каналов.

Код называется обратным, если для обратного преобразования любого слова в алфавите Y существует единственное слово (символ) в алфавите X .

Процесс, обратный кодированию и заключающийся в замене кодовой комбинации словом (символом) из алфавита X , называется декодированием.

Устройства, осуществляющие кодирование и декодирование, называются соответственно кодирующими устройствами (кодерами) и декодирующими устройствами (декодерами).

Различают следующие виды кодирования: смысловое, взаимодействие и помехоустойчивое.

Смысловое кодирование заключается в сопоставлении отдельным информационным признакам сигналов, сообщениям (S) кодовых комбинаций в некотором алфавите X . По существу, смысловое кодирование обеспечивает формализацию сообщений — индексацию и описание на языке алфавита X .

Кодирование взаимодействия обеспечивает переход от алфавита одного абонента A — алфавита X_A — к алфавиту X_B , принятому у

взаимодействующего с ним абонента B . При этом происходит как бы трансляция (перевод) сообщения с одного языка на другой.

Помехоустойчивое кодирование призвано обеспечить сообщениям защиту от их искажений под воздействием помех в каналах передачи данных, отказов аппаратуры и ошибочных действий операторов, а также обеспечить возможность обнаружения и исправления ошибок.

Смысловое кодирование осуществляется шифраторами информации источников информации (например, органами управления операторов) и измерительных устройств (кодирование результатов измерений).

Кодирование взаимодействия реализуется преобразователями кодов для обеспечения сопряжения технических устройств и общения человека с машиной.

Помехоустойчивое кодирование выполняется кодирующими устройствами систем передачи данных и вычислительных систем для обеспечения контроля данных и коррекции возникающих ошибок. Различие кодов и их характеристик объективно предполагает необходимость оптимального кодирования — выбора кода с наилучшими характеристиками. Решение этой задачи должно способствовать повышению достоверности передаваемых сообщений, сокращению объема передаваемых данных, обеспечению заданной скорости передачи или преобразования, упрощению аппаратуры.

В связи с этим важной характеристикой кодов и соответствующих им кодовых комбинаций является избыточность.

Под избыточными понимаются такие коды, которые содержат меньшее число используемых (разрешенных) кодовых комбинаций, чем это возможно при данных n и α , и такие кодовые комбинации, которые содержат большее число разрядов (n), чем это необходимо (n_{\min}) для передачи данного сообщения.

Наличие избыточности кодов позволяет увеличить достоверность передачи данных путем обнаружения и исправления искажений кодовых комбинаций в каналах связи. Коды, обладающие такими возможностями, называются помехоустойчивыми.

Для обеспечения защиты от искажений в кодовое слово помимо m символов слова, используемых для кодирования содержательной, информационной части сообщения, вводится r проверочных символов, необходимых для обнаружения и исправления искажений: $m + r = n$.

Коды, в которых положение проверочных символов фиксировано или известно, называются разделимыми, в противном случае они называются неразделимыми.

Степень защищенности сообщения при использовании помехозащитного кода определяется мерой близости кодовых слов — расстоянием между парой слов C_i и $C_j - d(C_i, C_j)$.

Расстояние по Хэммингу между кодовыми словами бинарного кода равно числу не совпадающих по своему значению разрядов пары слов C_i, C_j .

Минимальное расстояние $\min d(C_i, C_j)$ между любыми парами слов кода (множества кодовых слов) называется кодовым расстоянием d .

Связь между кодовым расстоянием и способностью обнаруживать и исправлять ошибки в кодовых комбинациях определяется следующей зависимостью: $d \geq t + S + 1$ при $t \geq S$, где d — кодовое расстояние; t — число (кратность) ошибок, которые обнаруживаются, а S — число ошибок, которые исправляются в кодовой комбинации.

В избыточном коде $d = 1$. Он не позволяет обнаруживать и исправлять ошибки. Если число искаженных символов меньше d , то полученная кодовая комбинация будет относиться к числу запрещенных комбинаций данного кода и ошибка будет обнаружена. В противном случае ошибка может быть не обнаружена.

Для оценки вероятностных характеристик кода наиболее часто используется математическая модель ошибки, в которой в каждом разряде слова ошибка может появиться с вероятностью p , независимо от состояния других разрядов. Математическое выражение для этой модели имеет вид

$$P_{nq} = C_n^q p^q (1 - p)^{n - q}.$$

Здесь P_{nq} — вероятность того, что при передаче по каналу связи в кодовой комбинации бинарного кода длиной n возникнет ошибка кратностью q .

Для обнаружения ошибок в системах передачи данных наиболее часто используется код с проверкой на четность.

Кодовые комбинации этого кода имеют один контрольный разряд, значения которого определяются результатами проверки числа единичных информационных разрядов. Если число единиц четное, то контрольный разряд $x_{m+1} = 0$, в противном случае $x_{m+1} = 1$. Значение x_{m+1} может быть определено сложением по модулю 2 значений всех информационных разрядов:

$$x_{m+1} = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_m.$$

При декодировании осуществляется аналогичная проверка, и если число единичных значений разрядов кодовой комбинации будет четным, то считают, что ошибки не произошло. В противном случае комбинация считается переданной неверно. Такой код позволяет обнаружить все ошибки нечетной кратности.

Обнаружение ошибок может быть также осуществлено k -кратным (чаще $k = 2$) повторением безыбыточного сообщения в целом или

каждого его символа с последующим сравнением повторов. Несовпадение свидетельствует о наличии ошибки. Подобные коды получили наименование кодов с повторением.

Число повторов k для исправления ошибок должно быть не меньше трех. Обработка полученных повторов кодовой комбинации в этом случае осуществляется по принципу голосования (по большинству) с порогом большим, чем $k/2$.

В качестве корректирующих кодов наибольшее распространение получили так называемые групповые и циклические коды.

Групповые коды имеют m информационных и r проверочных символов $\{ (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj}, b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{rj}) \}$, $j = 1 \div 2^n$ и обозначаются как (n, r) -коды.

Проверочные символы b_{ij} кодовых комбинаций формируются из информационных на основании выражения

$$b_{ij} = c_{i1}a_{1j} \oplus c_{i2}a_{2j} \oplus \dots \oplus c_{im}a_{mj} .$$

Здесь коэффициенты $c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{im} \in 0, 1$ и индивидуальны для каждого i -го проверочного разряда.

К числу групповых относится (7,4)-код Хэмминга. В этом коде проверочные символы располагаются на позициях $2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^{n-1}$ кодового слова начиная слева (табл. 4.3), а информационные — на оставшихся позициях 3,5,6,7, причем младший информационный разряд располагается справа.

Т а б л и ц а 4.3

КОДИРОВАНИЕ КОДОМ ХЭММИНГА

Информационная часть				Результат кодирования кодом Хэмминга							Дополнительный разряд
a_4	a_3	a_2	a_1	b_1	b_2	a_4	b_3	a_3	a_2	a_1	b_4
				1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1

Информационная часть				Результат кодирования кодом Хэмминга							Дополнительный разряд
a_4	a_3	a_2	a_1	b_1	b_2	a_4	b_3	a_3	a_2	a_1	b_4
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0

Значения коэффициентов $c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{ir}$ определяются в соответствии со значением i -го разряда двоичного числа l — номера позиции информационных символов. В данном случае $l = 3, 5, 6, 7$. Если двоичный эквивалент l содержит 1 в i -м разряде, то коэффициент равен 1. В противоположном случае он равен 0.

Так, для b_{1j} $c_{11}=c_{13}=c_{14}=1$, а $c_{12}=0$, поскольку a_1, a_3, a_4 расположены на позициях 7,5,3, а двоичные номера этих позиций (111), (101), (011) содержат в 1-м разряде 1, а двоичный номер a_2 , расположенного на позиции 6, (110), содержит в 1-м разряде 0.

Рассуждая аналогично, получим $c_{21}=c_{22}=c_{24}=1$; $c_{23}=0$; $c_{31}=c_{32}=c_{33}=1$; $c_{34}=0$. Таким образом, $b_{1j} = a_{1j} \oplus a_{3j} \oplus a_{4j}$; $b_{2j} = a_{1j} \oplus a_{2j} \oplus a_{4j}$; $b_{3j} = a_{1j} \oplus a_{2j} \oplus a_{3j}$.

В соответствии с этим правилом проставлены значения проверочных разрядов кода Хэмминга в табл. 4.3.

Значения информационных разрядов приведены в первом столбце. При приеме кодовых комбинаций осуществляется r проверок по отмеченному правилу с добавлением соответствующего контрольного разряда:

$$П_1 = b_{1j} \oplus a_{1j} \oplus a_{3j} \oplus a_{4j}; \quad П_2 = b_{2j} \oplus a_{1j} \oplus a_{2j} \oplus a_{4j};$$

$$П_3 = b_{3j} \oplus a_{1j} \oplus a_{2j} \oplus a_{3j}.$$

При отсутствии искажений двоичное число $\Pi = (\Pi_3\Pi_2\Pi_1) = (000)$. При искажении одного символа двоичное число $\Pi = (\Pi_3\Pi_2\Pi_1)$ однозначно укажет позицию искажаемого разряда, который может быть исправлен. Данный код имеет $d = 3$ и позволяет исправлять однократные ошибки.

Например, при искажении a_3 результат проверок $\Pi = (101)$, что соответствует 5-й позиции слова, в котором расположен a_3 . Введение в код дополнительной позиции 8 для проверки на четность всего слова увеличивает d до четырех и позволяет обнаруживать две и исправлять одну ошибку.

Циклические коды относятся к блочным, систематическим, равномерным кодам. Совокупность кодовых комбинаций циклического (n, r) кода может быть получена на основании образующего полинома r -й степени $S(x)$, в качестве которого выбирается неприводимый полином с фиктивной переменной $x^0 = 1$:

$$S(x) = x^r + c_{r-1}x^{r-1} + \dots + c_1x^1 + 1, \quad c_i \in \{0, 1\}.$$

Полином $S(x)$ может быть представлен в виде двоичного числа. Например, полиному 3-й степени $x^3 + x^1 + 1$ соответствует комбинация 1011. Примеры неприводимых полиномов и их двоичных эквивалентов даны в табл. 4.4.

Т а б л и ц а 4.4

ОБРАЗУЮЩИЕ ПОЛИНОМЫ

Неприводимый полином	Двоичный эквивалент полинома	Число ненулевых членов
$x^2 + x + 1$	111	3
$x^3 + x + 1$	1011	3
$x^3 + x^2 + 1$	1101	3
$x^4 + x + 1$	10011	3
$x^4 + x^3 + 1$	11001	3
$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$	11111	5
$x^5 + x^2 + 1$	100101	3

Неприводимый полином	Двоичный эквивалент полинома	Число ненулевых членов
$x^5 + x^3 + 1$	101001	3
$x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$	101111	5
$x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$	110111	5
$x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$	111011	5
$x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$	111101	5
$x^6 + x + 1$	1000011	3
$x^7 + x^3 + 1$	10001001	3

Чтобы закодировать двоичное сообщение $h(x)$ циклическим кодом $S(x)$, необходимо разделить многочлен $x^r \cdot h(x)$ на $S(x)$ и прибавить остаток от деления $R(x)$ к многочлену $x^r \cdot h(x)$.

Тогда полученный многочлен $k(x) = x^r h(x) + R(x)$ при делении на $S(x)$ будет давать остаток, равный нулю. Многочлен $k(x)$ представляет результат кодирования сообщения $h(x)$ кодом $S(x)$.

Если при передаче произойдет искажение, т.е. $k(x)$ обратится в многочлен $k^*(x)$, то при декодировании — делении $k^*(x)$ на $S(x)$ — будет получен остаток $R(x)$, не равный нулю при условии, что произошла обнаруживаемая ошибка. Его значение будет однозначно соответствовать искаженным символам кодовой комбинации, если кратность ошибки удовлетворяет кодовому расстоянию данного кода.

Для обнаружения однократных и двукратных ошибок выбор полинома может быть произведен на основании следующих соотношений: $n \leq 2^r - 1$ при $r \geq 3$.

При выборе полинома $S(x)$ степени r для исправления однократных ошибок справедливо соотношение

$$r = \lceil \log_2(n + 1) \rceil,$$

где r округляется до ближайшего большего целого числа.

Число ненулевых членов полинома $S(x)$ должно быть не менее d .

4.3.

Автоматизация передачи информации в системах испытаний

4.3.1.

Виды систем связи

Передача информации составляет одну из важнейших функций в системах испытаний.

Передача информации осуществляется в рамках специально организованной системы или комплекса систем, осуществляющих перенос сообщений от источников информации к ее потребителям, в качестве которых выступают объект испытаний и элементы системы испытаний.

Системы, реализующие функции передачи информации, называются системами связи. На базе систем связи или их отдельных подсистем организуются проблемно ориентированные системы управления, контроля, измерения, сбора и обработки данных конкретного прикладного назначения.

В современных испытательных системах приходится иметь дело с передачей данных, буквенно-цифровых текстов, речи, изображений подвижных и неподвижных объектов.

Неоднородность передаваемых сообщений и целей применения привела к необходимости создания нескольких видов связи.

Телеграфная связь обеспечивает передачу буквенно-цифровых текстов.

Телефонная связь рассчитана на передачу речевых сообщений.

Телевизионная связь предназначена для передачи изображений.

Видеотелефонная связь обеспечивает одновременную передачу изображения и речевых сообщений.

Факсимильная связь рассчитана на передачу неподвижных изображений текстов, таблиц, графиков, рисунков, фотографий и т.д.

Телемеханическая и телеметрическая связь обеспечивает передачу сообщений и сигналов контроля и управления.

Системы связи обеспечивают передачу аналоговых и дискретных (цифровых) сообщений. Системы связи, использующие двоичные цифровые сигналы, называются системами передачи данных.

Любая из систем связи представляет собой совокупность технических средств передачи, среды распространения сигналов, методов обработки информации и программного обеспечения, осуществляющих передачу сообщений между абонентами систем — источниками и потребителями сообщений, а также их взаимодействие.

Обобщенная структура системы связи приведена на рис. 4.5. Преобразование сообщений $U(t)$ в сигналы связи $S(t)$, прохождение их по каналам связи и обратные преобразования связаны с воздействием помех и отказов аппаратуры, в результате чего принятое сообщение $U^*(t)$ может отличаться от переданного. Кроме того, передача сообщений связана с определенной задержкой сообщений. Поэтому основными показателями качества систем связи являются верность передачи D , характеризующая меру близости (совпадения) переданного и принятого сообщения, и пропускная способность C , характеризующая количество информации, передаваемой в единицу времени. При этом пропускная способность должна быть согласована с производительностью источника и быстродействием потребителя.

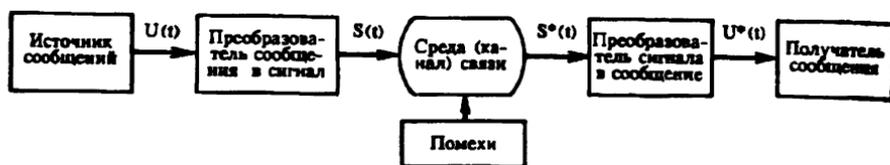


Рис. 4.5. Обобщенная структура системы связи

Качество и функциональные возможности связи определяются средой распространения сигналов связи, видом каналов связи, способом установления связи между различными абонентами, составом и характеристиками оборудования связи.

4.3.2.

Линии и каналы связи

Средой распространения сигналов связи (линией связи) является окружающее нас пространство или специально созданные проводники сигналов. Каждая из линий связи может быть использована для одновременной передачи сообщений по нескольким каналам передачи.

Канал передачи представляет собой совокупность среды распространения и каналообразующей аппаратуры (КОА), обеспечивающей преобразование сигналов сообщений в сигналы связи, их защиту от воздействия помех и взаимодействие с источником (потребителем) и аппаратурой связи приемника (передатчика). Каждый канал передачи обеспечивает передачу информации между парой абонентов — источником и потребителем сообщений.

Все оборудование системы связи разделяется на группы, каждая из которых обслуживает либо только один канал, либо совокупность каналов, образованных в данной линии связи, либо все линии и каналы системы.

Совокупность каналов связи вместе с относящейся к ним аппаратурой может рассматриваться как групповой канал передачи (тракт передачи) или как условная, самостоятельная линия связи.

Всю совокупность линий связи можно разделить на две большие группы — проводные линии связи и радиолинии связи (табл. 4.5).

Т а б л и ц а 4.5

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Тип линии связи	Частотный диапазон	Дальность передачи (без усиления), км	Число каналов
Проводные:			
воздушная линия	$0 - 10^5$ Гц	25 - 250	50
симметричный кабель	$0 - 10^6$ Гц	20	50 - 500
коаксиальный кабель	$0 - 10^8$ Гц	10	500 - 30000
волоконно-оптическая линия	$10^{14} - 10^{15}$ Гц	3 - 10	Более 2000
Радиолинии (КВ)	3 - 30 МГц	Более 2000	10
Радиорелейные (УКВ)	0,3 - 30 ГГц	10 - 60	Более 1000
Спутниковые (УКВ)	2 - 8 ГГц	Более 1000	Более 1000

Проводной называется линия связи, в которой сигналы распространяются вдоль искусственной среды — устройства непрерывной конструкции, способного передавать электромагнитную энергию в заданном направлении.

Радиолинией называется линия связи, в которой сигналы передаются в открытом пространстве с помощью радиоволн — электромагнитных волн с частотами до $3 \cdot 10^{12}$ Гц.

Основными характеристиками линий связи являются полоса частот, помехозащищенность и стоимость.

Полоса частот численно равна разности верхней и нижней частот электромагнитных колебаний (сигналов), эффективно передаваемых по линии.

Эта характеристика определяет возможность качественной передачи того или иного сигнала, число организуемых в линии каналов связи, пропускную способность системы связи и влияет на ее помехозащищенность.

Помехозащищенность характеризует способность линии связи противостоять воздействию искусственных и естественных помех в виде электромагнитных полей, наводок, излучений и т.п. Помехозащищенность зависит от типа линии связи, экранированности и изоляции линии от воздействия внешних факторов.

К проводным линиям связи относятся воздушные линии, кабельные — симметричные и коаксиальные, оптические волоконные световоды.

Воздушная линия состоит из двух параллельных проводов. Симметричный кабель также состоит из двух параллельных проводов, помещенных в диэлектрическую (изолирующую) среду. В коаксиальном кабеле проводник концентрически расположен внутри проводника, имеющего форму цилиндра. Проводники изолированы друг от друга. Проводные линии характеризуются первичными (сопротивление, емкость, индуктивность и проводимость) и вторичными (затухание, волновое сопротивление, пропускная способность) параметрами.

Пропускная способность определяется в основном полосой пропускания линии и уровнем помех в линии. Зависимость затухания сигнала от его частоты и длины предопределяет и зависимость пропускной способности от дальности передачи.

Проводные линии обеспечивают передачу сигнала на расстояние 25 — 200 км с вероятностью появления ошибки (искажения единицы информации) 10^{-2} — 10^{-4} . Для увеличения дальности передачи необходимо промежуточное усиление сигнала.

Схема проводной линии представлена на рис. 4.6,а. Она содержит приемник (Пр), передатчик (Пер), промежуточный усилитель сигналов (УС) и линию связи.

Волоконно-оптические линии представляют собой двухслойное волокно круглого (прямоугольного) сечения из стекол с различными коэффициентами преломления. От проводных линий они отличаются существенно меньшими значениями затухания сигналов и высокой помехоустойчивостью к электромагнитным воздействиям.

В волоконно-оптических линиях передача осуществляется световыми импульсами, формируемыми источником света (лазером). Длина передаваемых в световодах волн оптического диапазона составляет 0,85; 1,3 и 1,55 мкм.

Опыт практического применения таких линий показал возможность передачи информации на дальность свыше 50 км без промежуточного усиления со скоростью 10 Мбит/с с вероятностью ошибки 10^{-9} .

Радиолинии содержат радиопередатчик $P_{пер}$, радиоприемник $P_{пр}$ и антенные устройства A с фидерами Φ (рис. 4.6, б).

При передаче данных используется коротковолновый диапазон частот от 3 до 30 МГц. Однако большой уровень помех и зависимость от резко изменяющихся условий распространения позволяют осуществлять передачу на несколько десятков или сотен километров.

Для расстояний, повышающих прямую видимость, используются радиорелейные линии (рис. 4.6, в) с пунктами ретрансляции, удаленными на 40 — 60 км друг от друга при высоте антенн 40 — 50 м. Передача осуществляется в диапазонах дециметровых, сантиметровых и миллиметровых волн. Промехоустойчивость радиорелейных линий выше, чем у воздушных проводных линий. Космические радиолинии работают в диапазонах ультракоротких радиоволн с остронаправленными антеннами.

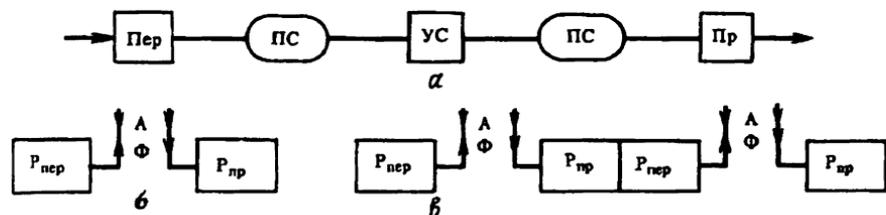


Рис. 4.6. Схемы линий связи:
а - проводная; б - радиолиния; в - радиорелейная

Радиолинии используются при летных испытаниях для телеуправления, телеконтроля ЛА и связи с удаленными мобильными стационарными пунктами и системами обеспечения таких испытаний.

Число каналов, образуемых в одной линии связи, зависит от вида сигналов, способов их модуляции и разделения каналов.

В случае частотного разделения каналов и использования гармонических носителей информации следует ориентироваться на стандартные типовые телефонный канал тональной частоты (ТЧ) с полосой пропускания от 300 до 3400 Гц, телевизионный канал с полосой пропускания 6 МГц, канал звукового вещания с полосой 30 — 15000 Гц, канал факсимильной связи с полосой 240 Гц.

При этом в каждом стандартном канале ТЧ может быть образовано несколько (до 24) телеграфных каналов телеуправления и телесигнализации с полосой пропускания 120 — 140 Гц и скоростью передачи 50 — 70 бод (бит/с).

При повышении скорости передачи данных число вторичных каналов уменьшается. Полоса пропускания телефонного или телеграфно-

го канала W и скорость передачи данных в бодах C связаны следующими примерными соотношениями: при амплитудной модуляции $W \approx 1,25 C$, при частотной модуляции $W \approx 3 C$.

В случае применения временного разделения каналов на один телефонный канал тональной частоты требуется полоса частот не в 4 кГц, а в 50 кГц.

Каналы различаются по виду используемой линии связи, виду передаваемых сигналов, скорости передачи, уровню защищенности от помех и другим признакам.

Передача сообщений по каналу может осуществляться между абонентами как в одну, так и в обе стороны. В первом случае канал называют симплексным. Во втором случае, в зависимости от того, одновременно или поочередно осуществляется связь, канал называется соответственно дуплексным или полудуплексным. Обратная связь может осуществляться по одной и той же линии связи (каналу связи) либо по разным. Для обеспечения двусторонней связи приемная и передающая сторона имеют двойной комплект аппаратуры (приемной и передающей).

По отношению к абонентам канал может быть закреплен постоянно (некоммутируемый или выделенный канал) или же он может обслуживать различные пары абонентов (коммутируемый канал). Если канал передает сообщения в аналоговой форме, то он называется аналоговым каналом, если в дискретной форме — дискретным.

Дискретные каналы, передающие цифровые сообщения, получили наименование каналов передачи данных.

Основными характеристиками канала является пропускная способность и верность передачи данных.

Пропускная способность канала передачи данных оценивается предельным числом данных, передаваемых по каналу за единицу времени, и измеряется в бит/с или бодах ($1 \text{ бод} = 1 \text{ бит/с}$).

Верность передачи данных или помехоустойчивость канала характеризуется вероятностью P искажения одного бита данных.

В процессе передачи сообщений канал обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- взаимодействие с источником и получение от него сообщения;
- преобразование сообщения абонента в сообщение системы связи (передачи данных);
- помехоустойчивое кодирование сообщения и реализацию других алгоритмов повышения верности передачи сообщения;
- выдачу в линию связи преобразованных сигналов сообщения;
- прием из линии связи сигналов сообщения;
- контроль правильности приема сообщения и взаимодействие передатчика и приемника в процессе передачи;
- преобразование сообщения системы связи в сообщение абонента;
- передачу сообщения приемнику.

Взаимодействие канала с источником и потребителем при получении и выдаче сообщения имеет своей целью согласование их быстродействия и вида сигналов, а также удобство восприятия принимаемых сигналов. Здесь возможно промежуточное накопление и хранение передаваемого сообщения, а также преобразование параллельной выдачи элементов в последовательную и обратно.

Сообщение системы связи отличается от сообщения источника видом сигналов, передаваемых затем по каналу связи, а также структурой.

Оно может содержать ряд дополнительных служебных реквизитов типа признаков начала и конца сообщения, адресов отправителя и получателя, временных меток, признаков типа сообщения (контрольное, служебное и т.п.) и его приоритета, сигналов синхронизации и др. Кроме того, осуществляется модуляция передаваемых в линию связи сигналов для согласования с ее параметрами, обеспечения необходимой скорости передачи, защиты от искажений и смещения спектра сообщения в полосу частот данного канала.

В интересах повышения верности передачи в канале может быть организована обратная связь от приемника к передатчику. В соответствии с этим различают каналы с информационной обратной связью (ИОС), решающей обратной связью (РОС) и каналы без обратной связи (БОС). В случае ИОС приемник передает полученное сообщение (полностью или частично) обратно передатчику и по результатам сравнения полученного и переданного сообщений подтверждается правильный прием и переход к передаче новых сообщений либо передача повторяется.

При РОС правильность приема определяется приемником на основе результатов декодирования, о чем передатчик уведомляется квитанцией (служебным сообщением). Отсутствие уведомления приводит к повторной передаче.

В каналах БОС вероятность передачи может быть увеличена заранее предусмотренным многократным повторением передачи одного и того же сообщения. Поэтому в качестве вторичных характеристик помехоустойчивости канала используются показатели среднего числа повторов, вероятностей неприема сообщения и др.

На рис. 4.7 представлена схема канала передачи данных, на которой изображены источники и приемник сообщений с кодером и декодером, обеспечивающими формирование и восприятие сообщения, а также комплекты абонентских устройств с передатчиком, приемником и устройствами сопряжения (УС).

Канал связи (линия связи) совместно с устройствами преобразования сигналов (УПС) образуют дискретный канал. Дискретный канал является самым низшим уровнем в системах передачи данных. Иногда его называют физическим каналом. Его функционирование не зависит от назначения системы, типа сообщений и алгоритмов передачи по се-

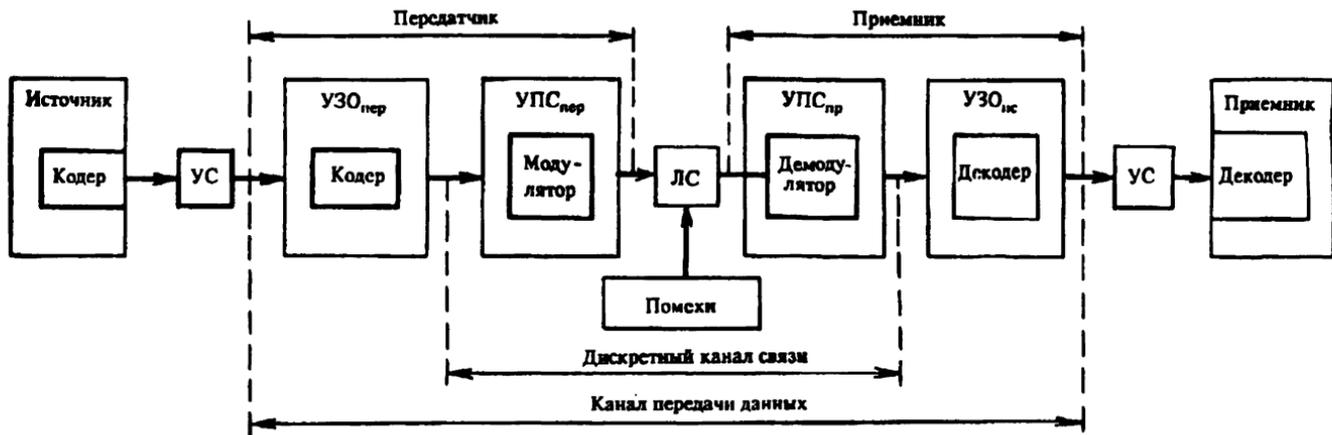


Рис. 4.7. Канал передачи данных

тям связи. Он осуществляет формирование линейных сигналов, их прием и преобразование в сигналы сообщения. В его состав входят модулятор и демодулятор линейных сигналов (сигналов сообщений системы передачи). Физический канал совместно с устройствами защиты от ошибок (УЗО) образуют канал передачи данных. В состав УЗО входят кодер и декодер канала передачи данных. Устройство сопряжения обеспечивает взаимодействие канала с абонентами.

В современных системах сопряжение каналов и окончного оборудования абонентов стандартизовано и согласование реализуется через УЗО и УПС.

4.3.3.

Разделение каналов

Создание многоканальных систем связи является одним из направлений повышения быстродействия, надежности и снижения стоимости систем связи. Сущность задачи заключается в обеспечении одновременной передачи сообщений по одной линии связи между несколькими источниками и потребителями.

Эта проблема получила название разделения или уплотнения каналов. Названия отражают разные стороны одного и того же процесса: объединение, группирование (уплотнение) первичных каналов в один групповой линейный канал (тракт) на передающей стороне и выделение из группового канала первичных каналов на приемной стороне (разделение).

Схема многоканальной передачи на основе одной линии связи представлена на рис. 4.8.

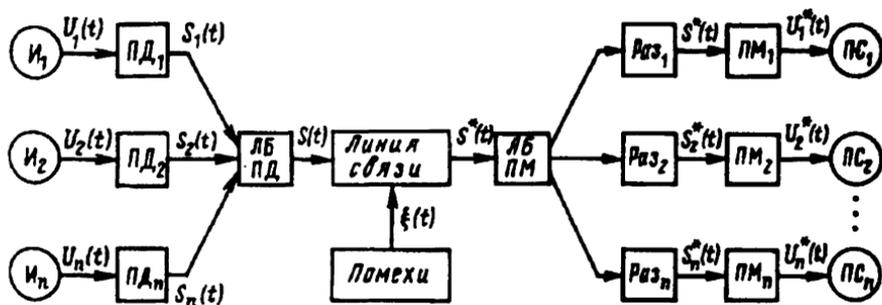


Рис. 4.8. Схема многоканальной системы связи

Сообщения $U_i(t)$ от источников U_i поступают на индивидуальные для каждого первичного канала передатчики $ПД_i$, формирующие признаки последующей селекции. Сообщения с выходов передатчиков $S_i(t)$ поступают в линейный блок $ЛБ$ передатчика, где они уплотняются в один групповой линейный тракт и поступают в линию связи. На приемной стороне сигналы группового сообщения $S^*(t)$ поступают на разделители $Раз_i$ первичных каналов, каждый из которых выделяет сигнал своего канала $S_i^*(t)$. Приемник $ПМ_i$ передает сообщение $U_i^*(t)$ потребителю $ПС_i$.

Наибольшее распространение получила многоканальная передача на основе частотного и временного разделения каналов.

Частотное разделение каналов (ЧРК) возможно за счет существенного превышения полосы пропускания линии связи W и спектра сигналов первичных сообщений Ω_i . Поэтому условием образования n непересекающихся по полосе пропускания линии связи первичных каналов является соотношение

$$\sum_{i=1}^n \Omega_i \leq W.$$

Реально для каждого из каналов создается определенный запас спектра для исключения взаимного влияния каналов.

Вместе с тем спектры первичных сообщений от источников, как правило, совпадают и занимают полосу частот, начинающуюся с нуля или близкую к ней.

Поэтому возникает необходимость разнесения спектров Ω_i по всей полосе пропускания W . Это достигается модуляцией гармонических колебаний (несущих) с различной частотой сигналами первичных сообщений.

В целях стандартизации и унификации оборудования систем связи (передачи данных) весь диапазон частот разбит на ряд стандартных участков шириной 4000 Гц, в качестве которых взят стандартный телефонный канал тональной частоты (ТЧ) с полосой пропускания 300 — 3400 Гц. Каждый из каналов ТЧ, в свою очередь, может разделяться на более узкие полосы (до 24 каналов).

В свою очередь, стандартные каналы ТЧ многоступенчато объединяются в более крупные тракты, рекомендованные для организации определенного вида связи.

По аналогичному принципу строится и каналообразующая аппаратура. Она включает в себя стандартное оборудование индивидуально-го преобразования для стандартных каналов ТЧ и оборудование различных ступеней группирования. Благодаря такому подходу отпадает необходимость создания сотен и тысяч индивидуальных преобразователей (модуляторов, демодуляторов).

Системы с ЧРК обеспечивают эффективное использование полосы частот пропускания линии связи, помехоустойчивость, возможность получения большого числа каналов, простоту сопряжения проводных и радиолиний связи.

Временное разделение каналов (ВРК) основано на последовательном подключении канала к каждому из источников и представлении непрерывного сигнала источника совокупностью отдельных его значений (дискретизации сигнала по времени).

Разделение каналов осуществляется путем поочередного и согласованного (на приемной и передающей стороне) подключения к линии (каналу) связи источников и приемников сообщений одного и того же канала. Подключение осуществляется циклически с интервалом $T_{ц}$ и длительностью передачи (времени подключения) сигналов каждого канала τ_n . Время цикла и длительность передачи для n одинаковых каналов связаны соотношением

$$T_{ц} = n (\tau_n + \tau_3) ,$$

где τ_3 — защитный интервал, т.е. время, выделяемое на переключение канала и рассогласованность передатчика и приемника. Для различных каналов

$$T_{ц} = \sum_{i=1}^n (\tau_{ni} + \tau_{3i}) .$$

Система с ВРК может успешно работать лишь при условии синхронной и синфазной работы приемного и передающего распределителя.

Наибольшее применение в системах с ВРК получили методы кодоимпульсной модуляции (КИМ). Этот вид модуляции предусматривает квантование амплитуды импульсов $U_i(t)$ с последующим кодированием результата квантования и представлением его в виде последовательности двоичных импульсов.

4.3.4.

Каналы передачи микропроцессорных и вычислительных систем

Развитие вычислительной и микропроцессорной техники и связанное с этим увеличение быстродействия и гибкости измерительных систем, систем сбора и обработки данных привело к созданию особых каналов и систем передачи данных на основе так на-

зываемых интерфейсов. Отличительной особенностью этих каналов является то, что они соединяют в себе функции передачи данных, коммутации потоков сообщений от различных источников сообщений, управление обменом данными, а при определенных условиях — и их частичной обработки.

Кроме того, их отличает высокий уровень универсальности, стандартизации, способность наращивания своих возможностей и программирования алгоритмов работы.

Как каналы передачи данных интерфейсы представляют собой одноканальные или многоканальные системы с временным разделением каналов, причем разделение осуществляется, как правило, относительно меняющихся во времени сочетаний пар абонентов интерфейса. В интерфейсах за счет аппаратурной избыточности (по числу линий связи) упрощены и стандартизованы процедуры коммутации каналов их взаимодействия и обеспечения помехоустойчивости.

Абонентами интерфейсов могут быть отдельные устройства ЭВМ, приборов, каналов связи, комплексы приборов, объектов испытаний и испытательные системы, системы связи, испытательные комплексы и вычислительные системы.

К основным характеристикам интерфейса относятся: функциональное назначение; тип организации связей; принцип обмена информацией; режим обмена; способ передачи; количество информационных и управленческих линий; количество адресов и команд; быстродействие; длина линий связи; число подключаемых устройств; тип линии связи.

По функциональному назначению интерфейсы можно подразделить на внутримашинные, внешние интерфейсы периферийных устройств и приборные интерфейсы, системные интерфейсы (интерфейсы локальных сетей), интерфейсы обмена данными с удаленными абонентами. Некоторые интерфейсы могут использоваться для выполнения разных функций.

По типу организации связей интерфейсы подразделяются на магистральные, радиальные, древовидные, радиально-магистральные, кольцевые и другие.

По принципу обмена информацией различаются интерфейсы с параллельной, последовательной и параллельно-последовательной передачей информации.

В зависимости от режима обмена информацией различаются интерфейсы с симплексным, полудуплексным, дуплексным и мультиплексным режимами обмена.

В симплексном режиме лишь один из двух абонентов может передавать данные по интерфейсу.

При взаимодействии в полудуплексном режиме любой абонент может начать передачу информации другому, если интерфейс свободен.

В дуплексном режиме каждый абонент может начать передачу другому абоненту в произвольный момент времени.

Мультиплексорный режим обеспечивает в любой момент времени связь между парой абонентов в любом, но единственном направлении от одного абонента к другому.

Способ передачи определяет порядок согласования работы абонентов интерфейса во времени. По этому признаку интерфейсы делятся на синхронные и асинхронные.

При синхронной передаче происходит постоянная привязка цикла обмена к временной шкале, генерируемой единым источником, например ЭВМ.

Синхронизация должна ориентироваться на наименее быстродействующее устройство, участвующее в обмене данными.

Асинхронный способ не предусматривает такой привязки и позволяет согласовать работу различных по быстродействию устройств. Он обеспечивается простейшими командами типа: «Готов к обмену», «Начало обмена», «Конец обмена», «Контроль обмена».

Применение интерфейсов в системах измерения, сбора и обработки данных и управления испытаниями позволяет осуществить многоступенчатое объединение групп близко расположенных устройств, приборов, модулей в отдельные относительно самостоятельные ветви, локальные сети, территориальные и функциональные сети, структуры и системы управления и обработки данных.

В табл. 4.6 приведены характеристики последовательных и параллельных магистральных и последовательных радиальных интерфейсов, которые могут быть использованы для этих целей.

Магистральные интерфейсы могут служить в качестве интерфейсов ветвей (ИВ) или локальных сетей. ИВ представляет собой канал передачи данных последовательным или параллельным кодом, обеспечивающий взаимодействие ЭВМ (микропроцессора, контроллера) ветви с подсоединенными к ней приборами, терминалами и другими устройствами. Абоненты канала подключаются к нему либо непосредственно, либо через устройства сопряжения с магистралью — адаптеры (АД). Возможно подсоединение через коллективные адаптеры (АК) группы абонентов.

ИВ подсоединяется к магистрали ЭВМ через контроллер ветви (КВ), обеспечивающий управление передачей информации в магистрали и сопряжение ее с ЭВМ. Контроллер может служить средством увеличения (расширения) магистрали.

На рис. 4.9 представлена структура ИВ, характерная для широко применяемых измерительных комплексов типа ИВК.

Для объединения ветвей и ЭВМ в более сложные структуры используются магистральные и радиальные интерфейсы. Последние могут также использоваться для подсоединения к ЭВМ или ИВ удален-

ных абонентов. На рис. 4.10,а и б представлены схемы объединения ветвей и УВК посредством интерфейса межмашинной связи (ИМС), интерфейсов подключения удаленных абонентов (ИУА) и сложных контроллеров — устройств межмашинной связи (УМС).

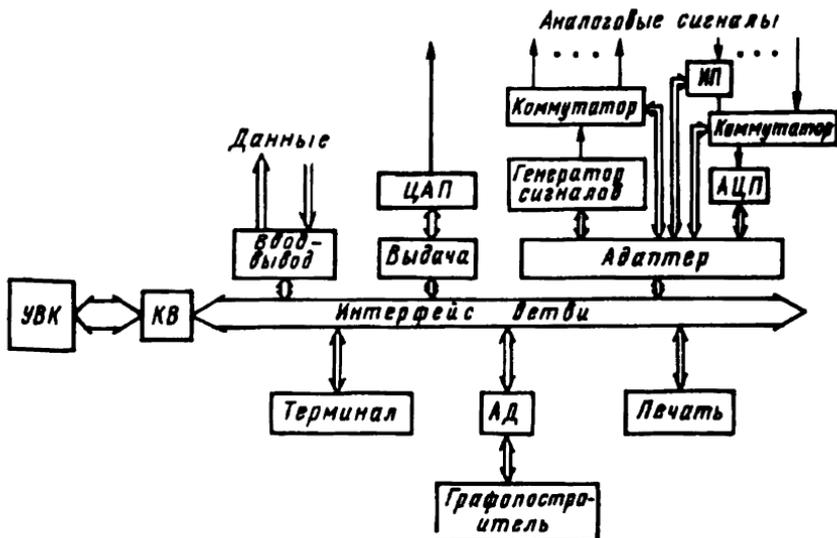


Рис. 4.9. Структура ИВ

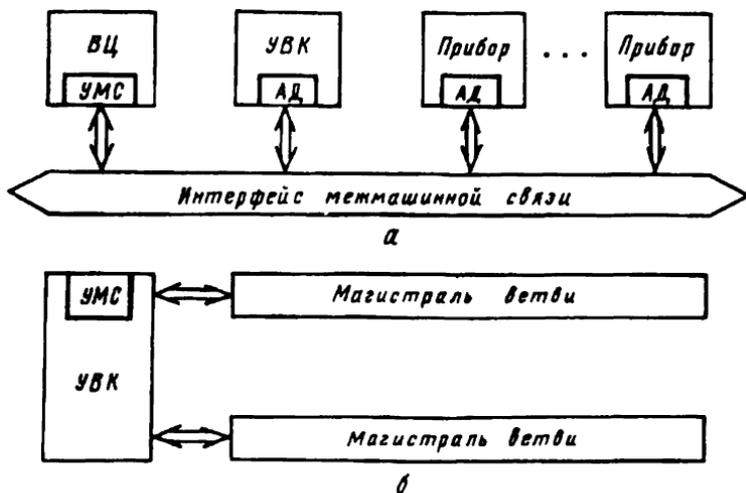


Рис. 4.10. Схемы объединения ветвей

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕРФЕЙСОВ

Название интерфейса	Зарубежный аналог	Тип организации связей	Число подключаемых абонентов	Число линий	Скорость передачи, Кбод	Длина линии, м
Общая шина	Unibus	Магистральный	20	56	$5 \cdot 10^3$	15
ИЧ1	Multibus	—"	20	41	$5 \cdot 10^3$	15
МПИ, шина «Электроника 60»	Q - bus	—"	40	500	2	—
Приборный интерфейс	IEEE 488 - 78	—"	15	16	$1 \cdot 10^3$	20
Камак	Camac	—"	25	86	3000	Зависит от версии
ИРПС	RS 232 C	Радиальный	2	2	25	1500
ИЛПС	PROWAY	Магистральный	100	2	62	3000
—	Ethernet	—"	1024	2	$10 \cdot 10^3$	2500
ИРПР	BS 4421	Радиальный	2	40	250	15

Особая разновидность магистральных интерфейсов — последовательные интерфейсы на основе моноканала. Моноканал состоит из канала передачи данных и адаптеров, обеспечивающих сопряжение абонентов с каналом. При использовании моноканала данные в канале доступны всем абонентам. В качестве передающей используются пара проводов, коаксиальные или волоконно-оптические кабели, которые обеспечивают высокую пропускную способность: на расстояниях до 200 м — 1 — 200 Мбит/с, до 1 км — 1 — 100 Мбит/с, до 2 км — 0,1 — 20 Мбит/с.

Подключение абонентов к моноканалу осуществляется через адаптеры, которые могут быть удалены от канала на 10 — 20 м. Присоединение к моноканалу (рис. 4.11, а, б) осуществляется через механический разъем, на концах жил и коаксиального кабеля устанавливаются схемы согласования из резисторов.

Волоконно-оптический канал состоит из сегментов, соединяющих пару адаптеров. Передача в различных направлениях осуществляется по отдельным линиям. Приемопередатчик абонента соединяется с каналом посредством светодиода и фотодиода через оптический разъем (рис. 4.11, в).

Адаптеры имеют в своем составе простейший приемопередатчик, устройство управления приемом, передачей и сопряжением с абонентом. В состав может также входить буферная память. Моноканалы имеют возможность наращивания длины с помощью ретрансляторов на 1 — 2 км.

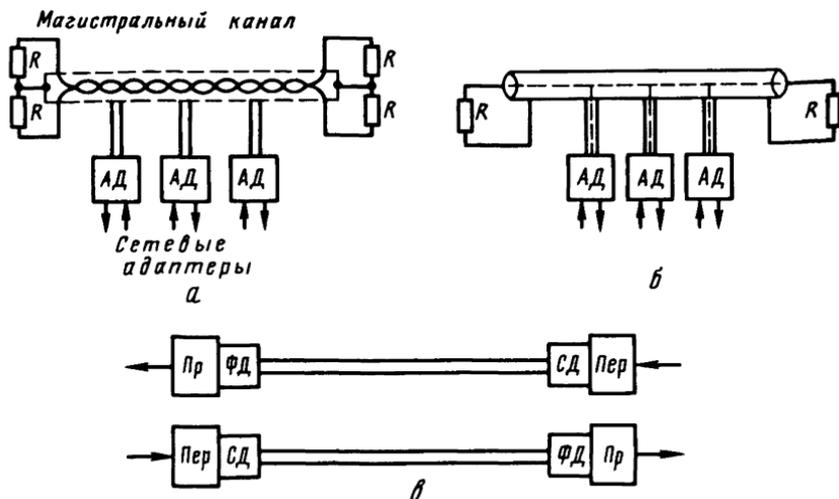


Рис. 4.11. Структура моноканала:
 а — витая пара проводов; б — коаксиальный кабель;
 в — волоконно-оптическая линия

Представляет интерес сеть Ethernet (США). В качестве передающей среды используется коаксиальный кабель. Скорость передачи 10 Мбит/с. Сеть может объединять до 1024 систем на расстоянии до 2,5 км. К сегменту кабеля длиной 500 м может подключиться до 100 приемопередатчиков. Кабель имеет четыре витые пары жил. Длина кабеля адаптера до 50 м. Передача осуществляется кадрами объемом 50 — 1500 байт. Применяется помехоустойчивое кодирование циклическим кодом.

Наличие широкого набора средств связи и передачи данных на базе современной микропроцессорной и вычислительной техники позволяет создать различные по своему назначению, составу, сложности и конфигурации системы, в наибольшей степени отвечающие конкретным условиям данной системы испытаний. Программная и аппаратурная совместимость в совокупности с модульно-агрегатными методами конструирования аппаратуры обеспечивает возможность гибкого и оперативного наращивания возможностей и сопряжения различных по принципам построения систем испытательных комплексов, средств связи и передачи данных. При этом обеспечивается возможность приближения процессов обработки информации к местам ее формирования, создание локальных, децентрализованных и в определенной мере самостоятельных подсистем на базе территориально обособленных процессов и систем испытаний, объектов испытаний, систем сбора телеметрической информации, центров обработки данных и управления испытаниями. В результате объединения этих подсистем образуются достаточно сложные сети связи, передачи и распределения данных.

4.4. Автоматизация измерений

4.4.1. Структура и характеристики измерительного канала

Измерение параметров объектов и процессов является одной из основных функций управления и обработки данных в системах испытаний.

Измерение есть процесс, направленный на получение измерительной информации — количественных характеристик измеряемых величин (параметров объекта и технических средств испытаний). Он включает отдельные подпроцессы (этапы) получения, сбора информации

от объекта, ее преобразования, определения количественных характеристик, обработки, отображения, регистрации, хранения и выдачи потребителям (операторам) в виде, удобном для восприятия, принятия решений или дальнейшей обработки.

Автоматизированная система измерений (АСИ) — это совокупность аппаратных, программных средств и операторов, предназначенных для реализации процесса измерений. АСИ может быть самостоятельной системой или входить в состав более сложных систем управления, контроля или сбора и обработки экспериментальных данных.

Состав функций АСИ зависит от требований, предъявляемых к ней, и принятого порядка распределения функций между подсистемами более сложных систем. Так, например, функции сбора, обработки, передачи информации могут выполнять самостоятельные технические системы, образующие совместно с системой измерения целевую систему управления и контроля или сбора и обработки экспериментальных данных.

Основным моментом измерения является сравнение неизвестной величины с физически однородной ей величиной известного значения (мерой, эталоном). В зависимости от характера сопоставления можно выделить два типа измерений — абсолютное (собственно измерение) и допусковое. Допусковое измерение связано с установлением факта нахождения этой величины в заданных пределах, допусках. Результат измерения в этом случае имеет двоичную меру типа «да, нет», «в норме, не в норме», «больше, меньше».

Характер измерения имеет большое значение для построения соответствующих технических средств. Вместе с тем допусковое измерение может быть осуществлено на любом из этапов абсолютного измерения, включая этап обработки результатов, поэтому специально этот вид измерения не рассматривается.

Совокупность технических средств, обеспечивающих выполнение полного цикла измерений параметров одного источника первичной информации, называется первичным (индивидуальным) каналом измерения. Совокупность индивидуальных каналов, содержащих в качестве своего функционального элемента одно общее для них устройство (например, измеритель), образует групповой измерительный канал. Обычно он содержит однородные по измеряемым величинам, типам сигналов или метрологическим характеристикам индивидуальные каналы. Объединение измерительных трактов образует информационную систему.

Уровень объединения (аналоговый канал, измерительный преобразователь, канал передачи данных, устройство обработки и т.п.) зависит от технических возможностей элементов каналов, характера и номенклатуры носителей информации и взаимного расположения объекта и элементов первичных каналов.

Необходимость объединения индивидуальных каналов диктуется требованиями надежности, экономичности и другими техническими и эксплуатационными требованиями. А возможность объединения обеспечивается совокупностью функциональных свойств элементов первичных и групповых каналов, которые, сохраняя индивидуальное содержание носителя первичной информации относительно измеряемой величины, осуществляют изменение формы его представления. Это изменение происходит таким образом, что на каждом из уровней объединения образуются идентичные, унифицированные в определенном смысле формы носителей информации, неразличимые по своему содержанию для данного элемента группирования. И чем выше по иерархии системы измерения расположен такой элемент, тем более универсальными являются его измерительные функции.

В современных АСИ на вход, как правило, поступают вторичные аналоговые электрические сигналы о параметрах объекта, формируемые первичными преобразователями (датчиками), установленными на объекте, либо устройствами сопряжения с объектом или специальной системой сбора первичной информации.

Состав технических средств АСИ определяется функциональной структурой измерительного тракта.

В зависимости от удаления от объекта, вида и характеристик сигналов, возможностей элементов каналов существует множество вариантов построения АСИ. На рис. 4.12 представлены некоторые из них. Они содержат первичные преобразователи (ПП), измерительные преобразователи (ИП), коммутаторы аналоговых (К) и мультиплексоры (М) цифровых каналов, аналоговые каналы систем связи (КСС) и дискретные каналы систем передачи данных (КПД), аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), устройства управления (УУ), устройства обработки информации (микропроцессоры или ЭВМ), ее регистрации (УРИ) и отображения (УОИ).

Первичный преобразователь (датчик) обеспечивает преобразование физических величин (температуры, давления, ЭДС и других параметров объекта испытаний или испытательной среды) во вторичные, обычно электрические, сигналы, те или иные параметры которых являются носителями информации. Основная цель ПП — формирование носителей информации, пригодных для использования в АСИ.

Измерительные преобразователи представляют широкий класс приборов, обеспечивающих согласование выходных сигналов ПП и измерителя.

Измерительные коммутаторы аналоговых и дискретных (мультиплексоры) каналов обеспечивают объединение (группирование) первичных измерительных каналов в измерительные тракты и системы.

Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) выполняют функции

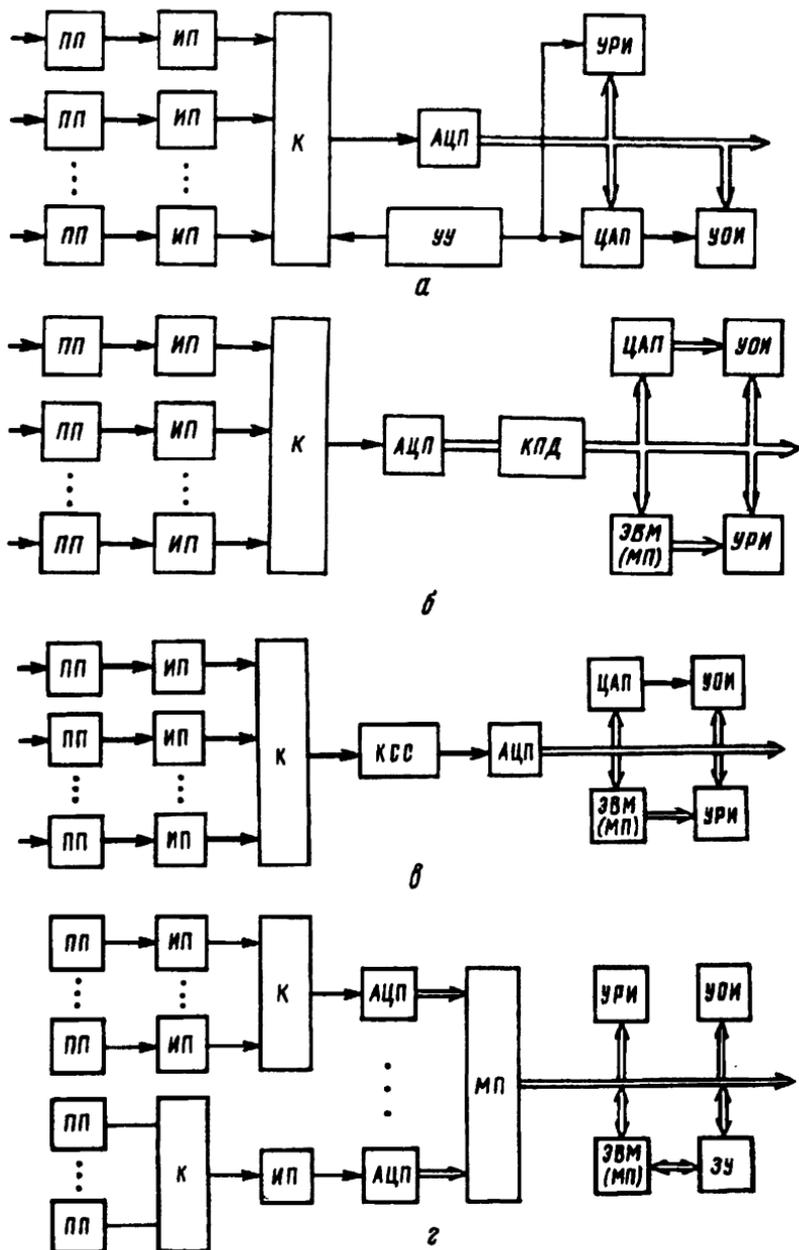


Рис. 4.12. Схемы измерительного канала:
а — сосредоточенного; *б* — с передачей дискретной информации;
в — с передачей аналоговой информации; *г* — с мультиплексором

измерения аналоговых сигналов. Результат измерения представляется на выходе АЦП в виде цифры — кодовой комбинации.

Цифро-аналоговые преобразователи обеспечивают согласование источников цифровой информации и аналоговых исполнительных механизмов и приборов (например, стрелочных индикаторов, выключателей, регуляторов и т.п.).

Каналы связи и передачи данных обеспечивают передачу сообщений между элементами АСИ. Это могут быть обычные проводные или волоконно-оптические линии, или интерфейсы, либо каналы связи и передачи данных с временным или частотным разделением каналов телеметрических или вычислительных сетей соответственно.

Устройства обработки, отображения и регистрации информации представляют собой комплексы диспетчерского оборудования, в которые могут входить как простейшие устройства индикации, самопишущие приборы и вычислители, так и крупные системы отображения, текстовой, графической и машинной регистрации, электронно-вычислительные машины и комплексы.

Наличие в измерительных системах ЭВМ и ЦАП позволяет им выполнять более широкие функции обработки экспериментальных данных и даже управления процессом испытаний.

Создание современных измерительных устройств, приборов, систем и комплексов в интересах испытаний осуществляется посредством выбора, компоновки, агрегатирования, проектного объединения унифицированных, различных по своим функциям и сложности элементов комплексов средств вычислительной, электроизмерительной и другой техники Государственной системы приборов и средств автоматизации (ГСП).

При этом важное значение приобретают специфические для задач измерения свойства и характеристики элементов комплексов ГСП. Эти свойства разделяются на две группы: метрологические свойства и неметрологические, или общетехнические, свойства.

Метрологические свойства характеризуют способность технических средств осуществлять те или иные виды измерений и обработки результатов измерений.

К основным метрологическим характеристикам технических средств измерения относятся функция преобразования, чувствительность, порог чувствительности, диапазон изменения измеряемой величины, диапазон показаний и цена деления шкалы, погрешности измерения.

Функция преобразования (статическая характеристика преобразования) — функциональная зависимость между информативными параметрами выходного и входного сигналов средств (каналов) измерений. Характеристика используется при обработке результатов измерений.

Чувствительность средств измерений — отношение приращения выходного сигнала к вызвавшему его изменению входного сигнала.

При нелинейной статической характеристике чувствительность зависит от значения измеряемой величины, при линейной она постоянна.

Порог чувствительности — наименьшее изменение входной величины, обнаруживаемое с помощью данного средства.

Диапазон изменения измеряемой величины — область значений измеряемой величины, для которой нормированы (установлены) допускаемые погрешности средств измерений и предельно возможные (наибольшее и наименьшее) значения величины, воспринимаемые данным средством. Характеристика определяет возможность применения измерительного средства и необходимость управления диапазонами измерений.

Диапазон показаний и цена деления шкалы измерительного устройства — значения измеряемой величины или их разность, соответствующие предельным или соседним отметкам шкалы показаний. В случае двоичного или других видов цифрового кодирования указывается число разрядов, основание кода и цена младшего разряда. Характеристики определяют возможность использования данного средства.

Погрешность измерений — это разница (степень несоответствия) между истинным и измеренным значениями величины. Погрешность может быть выражена в виде абсолютной, относительной или приведенной погрешности и определяется по отношению к входным величинам данного средства или измерительного канала в целом.

Различают статическую и динамическую погрешность. Динамическая погрешность обусловлена инерционными свойствами измерительного средства (канала) и характеризует несоответствие во времени действительных и измеренных значений величины. Динамическая погрешность определяется как разность между погрешностью в динамическом режиме и статической погрешностью.

Погрешность является основным показателем качества измерений (точности измерений) и определяет возможность и эффективность использования данного средства, канала или АСИ в целом в составе данной системы испытаний. Обобщенным показателем уровня погрешности является класс точности измерительных средств.

Для определения возможности применения технических средств используются такие частные динамические характеристики, как время установления показаний устройства или время установления выходного сигнала, определяемое от момента скачкообразного изменения входной величины и до моментов установления с заданной погрешностью показания или значения выходной величины соответственно.

Методы измерения характеризуют способ получения, состав и процедуры обработки промежуточных измерений для определения необходимых количественных, функциональных и статических характеристик измеряемой величины. Они определяют точность измерения, состав измерительных средств, количество одновременно функциониру-

ющих каналов измерений, алгоритмы взаимодействия между элементами АСИ, АСИ и объектом испытаний, процедуры, программы и характеристики средств обработки результатов измерений.

Неметрологические характеристики отражают общетехнические и эксплуатационные свойства измерительных средств и возможность их использования в конкретных системах и условиях испытаний. Кроме того, некоторые из них косвенно влияют на метрологические свойства.

Основными неметрологическими характеристиками являются: надежность, быстродействие, помехоустойчивость, верность передачи информации, пропускная способность, производительность, срок службы и ресурс работы, ремонтпригодность, энергопотребление, габариты, массовые характеристики и т.п. Для современных измерительных средств на основе микропроцессорной и вычислительной техники важное значение имеет их аппаратурная, алгоритмическая и программная совместимость.

Возможность применения измерительных средств зависит также от установленных для них условий эксплуатации (температуры, влажности, вибраций, давления и т.п.). Особое значение это имеет для ПП, подвергающихся зачастую непосредственному воздействию испытательной среды.

4.4.2.

Элементы измерительных систем

Для каждого из элементов АСИ общие свойства и характеристики имеют свое конкретное выражение в зависимости от их назначения и конкретных условий эксплуатации в данной системе испытаний.

Первичные преобразователи (ПП) обеспечивают восприятие и фиксацию первичной испытательной информации — параметров объекта испытаний и испытательной среды — и формирование сигналов-носителей экспериментальных данных об этих параметрах.

Их состав для каждой системы испытаний, объекта испытаний и конкретного эксперимента различен. При оценке свойств ПП важное значение имеет определение необходимости последующего преобразования (усиления, масштабирования, унификации) его выходного сигнала, линеаризации функции преобразования измеряемой величины, обеспечения электроэнергией, а также установление метрологических требований к измерению первичного параметра (точности измерений, периодичности опроса в процессе испытаний, видов обработки результатов измерений и т.п.).

Наиболее характерными видами информативных параметров и выходных сигналов ПП являются постоянные и переменные токи и напряжения, частота, фаза, мощность электрических сигналов, активные и реактивные сопротивления, емкости, индуктивности, импульсные и гармонические последовательности, временные параметры сигналов и т.п.

Основные функции измерительных преобразователей (ИП) заключаются в нормировании и унификации сигналов ПП, обеспечении метрологической совместимости с другими элементами канала и повышении точности измерений. Это достигается за счет усиления, нормализации сигналов, преобразования одного вида сигнала в другой или одного информационного параметра сигнала в другой информационный параметр и других линейных (масштабирование, температурная компенсация, установление нуля и т.п.) и нелинейных (фильтрация помех, линеаризация сигнала ПП) преобразований.

В соответствии с ГОСТами в качестве носителя приняты электрические сигналы постоянного и переменного тока. Уровни постоянного тока в системе должны изменяться в различных диапазонах в пределах ± 100 мА. Уровни напряжений постоянного тока устанавливаются в различных диапазонах в пределах ± 10 В. При этом лимитируются и нагрузочные сопротивления. Преобразователи с токовым выходом используются, как правило, при передаче сигналов на большие расстояния.

Использование средств микроэлектроники и вычислительной техники потребовало введения унифицированных сигналов напряжения постоянного тока 0 — 5 В. На переменном токе в качестве основных унифицированных применяются сигналы с уровнями $(-1,0) + (+1,0)$ В; 0 + 2,0 В при частоте 50 или 400 Гц.

Частотные сигналы применяются для дистанционной передачи, а также при высоком уровне помех.

По принципу действия ИП подразделяются на усилители, делители, стабилизаторы напряжения и тока, шунты, мостовые схемы, измерительные трансформаторы, преобразователи постоянного тока и напряжения в переменные и обратно, функциональные операционные усилители и др.

В случае применения ПП или использования комплексных элементов с цифровым выходом в составе АСИ могут применяться преобразователи кодов. Некоторые ПП осуществляют функции умножения, деления, возведения в квадрат и извлечения корня преобразуемых величин, определения их отношений, сравнения с уставками и др.

ИП по форме представления выходной величины подразделяются на аналоговые и дискретные.

ИП могут быть универсальными и специализированными. Так, например, некоторые ИП приспособлены для сопряжения с определенным видом датчиков (пьезодатчиками, термометрами сопряжения, термоэлектрическими термометрами и т.п.).

Различают индивидуальные, групповые и многоканальные ИП. Индивидуальные ИП обслуживают один ПП. Групповые ИП обслуживают определенную группу ПП с однородными выходными сигналами. Они располагаются после коммутатора и требуют специального управления. Иногда такие ИП совмещают в себе и функции коммутатора.

Если выходные сигналы ПП разнородны, то применяются многоканальные ИП, представляющие собой конструктивное объединение нескольких индивидуальных ИП. Характеристики некоторых ИП в приборном исполнении приведены в табл. 4.7.

Применение измерительных коммутаторов (ИК) и мультиплексоров позволяет уменьшить объем оборудования и построить многоканальные системы передачи информации по принципу временного или пространственного разделения каналов. Выбор места расположения, числа, структуры соединения коммутаторов и мультиплексоров и их характеристик существенно влияет на качество измерения и другие технические и эксплуатационные характеристики АИС в целом.

В условиях применения микропроцессорной техники важное значение имеет программируемость работы ИК, включая и внешнее оперативное программирование, и управление со стороны ЭВМ.

В общем случае коммутатор представляет собой (n, m) -полюсник с n входами и m выходами. В случаях, когда $m > n$, он называется распределителем. ИК — это такой коммутатор, параметры которого нормированы исходя из метрологических требований.

Коммутационные возможности ИК характеризуются значениями n , m , числом одновременно образуемых цепей r , а также доступностью коммутатора — способностью образовывать цепи между различными входами и выходами. Коммутатор считается полностью доступным, если он способен образовать цепи между любыми парами входов и выходов.

По виду коммутирующих элементов коммутаторы разделяются на две группы: контактные (механические, электромеханические) и бесконтактные (электронные). В контактных коммутаторах образование цепей происходит посредством замыкания и размыкания механических контактов. Такие коммутаторы имеют быстродействие порядка 0,5 — 2 мс, низкое сопротивление замкнутой цепи (0,02 — 0,2 Ом) и высокое сопротивление разомкнутой цепи (более 10^9 Ом) и способны коммутировать мощные сигналы. Бесконтактные коммутаторы имеют существенно меньшие габариты, большее быстродействие (0,5 — 5 мкс) и потребляют меньше электроэнергии. Сопротивление замкнутой и разомкнутой цепей у них составляет соответственно 50 — 400 Ом и 200 — 500 кОм.

В современных АСИ используются коммутаторы в приборном и модульном исполнении. Характеристики некоторых из них приведены в табл. 4.8.

В бесконтактном коммутаторе (рис. 4.13) дешифратор-распределитель обеспечивает адресный выбор ключа (Кл) по коду адреса. При

Т а б л и ц а 4.7

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Тип ИП	Преобразуемая величина	Входная величина	Диапазон изменения	Выходная величина	Диапазон измерения	Класс точности	Быстродействие, с
Ф87	Постоянный ток	Ток, напряжение	$\pm 5 \text{ мА}$ $\pm 10 \text{ В}$	Ток	$0 - \pm 100 \text{ мА}$	0,05	0,001
Ф8024	Переменное напряжение	Напряжение	$10 \text{ мкВ} - 10 \text{ мВ}$	Напряжение	$\pm 10 \text{ В}$	2; 0,5; 0,25	0,001
EM01.5.015	Напряжение постоянного тока	Ток, напряжение	$1 \text{ нА} - 10 \text{ А}$ $0,1 \text{ мкВ} - 1000 \text{ В}$		$\pm 10 \text{ В}$	0,01	0,1
В828	Частота переменного тока	Частота	$45 - 55; 47 - 52;$ $49 - 51; 55 - 65 \text{ Гц}$		1,5; 0,5	1	
В848	Активная мощность	Ток, напряжение	$0 - 0,5; 1 - 2,5;$ $5,0 \text{ А}$ $8,5 - 115 \text{ В}$		0,2	2,5	
В830	Реактивная мощность	Ток	$0 - 0,5; 1,0; 2,5;$ $5,0 \text{ А}$		0,2	2,5	
EM01.5.014	Фазовый угол	Фаза напряжения и тока	$\pm 90^\circ$	Напряжение	$0 - 10 \text{ В}$	0,5	1
1Ц705	Сигналы термоэлектрических преобразователей (ТП)	Напряжение от ТП типа ТХК; ТХА; ТПП; ТПР; ТВР	$0 - 50 \text{ мВ}$			1,0; 0,5	0,5
1Ц703	Сигналы термометров сопротивления	Сопротивление	$0 - 400 \text{ Ом}$			0,5	0,5
НП-ПЗ	Сигналы трансформаторных датчиков	Индуктивность	$0 - 10 \text{ мГн}$			1,0	1,0

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОММУТАТОРОВ

Тип коммутатора, модуля	Количество каналов	Число линий в канале	Тип контактов	Диапазон сигнала, В	Сопротивление линии, Ом		Время переключения, мкс	Основная приведенная погрешность	Тип интерфейса
					замкнутой	разомкнутой			
Ф799 1/2	100	3	к/бк	± 3	0,3/100	$4 \cdot 10^7$	10	0,01/0,5	-
Ф240	100	3	к	$U_{\pm} = 180$ $U_{-} = 130$	0,4	$150 \cdot 10^9$	$20 \cdot 10^3$	-	-
ФК78	32	2	бк	± 10	150	$2 \cdot 10^8$	2,5	$\pm 0,05$	КАМАК
ФК79			к	± 50	0,3	$1 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^3$	$\pm 0,02$	
МКАС-1	64	-	бк	± 5	-	-	0,5	0,05	И41
МКБ	32	3	бк	± 12	370	$2 \cdot 10^8$	1	0,02	И41
МКК	8	3	к	± 110	0,5	10^9	$5 \cdot 10^3$	0,01	И41

циклическом опросе дешифратор-распределитель осуществляет последовательный опрос ключей. Выходные сигналы ключей объединяются сумматором Σ .

В пирамидальном контактном коммутаторе (рис. 4.14) выходные сигналы дешифратора-распределителя воспринимаются обмотками электромагнитных реле, каждое из которых управляет состоянием контактов каждой ступени коммутатора. Выбор конкретной цепи осуществляется заданием комбинации включенных и выключенных реле. В частности, при отключенных реле будет замкнута первая цепь.

Мультиплексор является коммутирующим элементом вычислительных и микропроцессорных систем. На рис. 4.15 представлена схема мультиплексора на два входа, каждый из которых содержит четыре цепи. В состав схемы входят ключи, сумматоры сигналов (схемы «ИЛИ») и устройство управления, обеспечивающее выбор каналов.

Коммутатор АСИ может строиться по многоуровневой схеме, состоящей из последовательного соединения единичных коммутаторов каждой ступени.

В современных АСИ все большее применение находят программируемые коммутаторы, соединенные интерфейсом с внешним или встроенным микропроцессором (МП). Схема многоступенчатого программируемого коммутатора представлена на рис. 4.16.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) являются основным измерительным элементом современных цифровых приборов и микропроцессорных АСИ. АЦП осуществляет преобразование аналогового информационного параметра измеряемого сигнала в цифру — количественный эквивалент параметра.

АЦП применяются для измерения большого числа электрических и неэлектрических параметров — постоянных и переменных токов и напряжения, сопротивления, емкости, индуктивности, частоты, перемещения и др. Однако для непосредственного измерения АЦП эти параметры предварительно преобразуются с помощью аналоговых преобразователей к одному из стандартных параметров: амплитуде напряжения, временному интервалу, частоте гармонических колебаний, импульсным последовательностям. Поэтому все виды АЦП подразделяются на две группы: АЦП непосредственного измерения и АЦП с предварительным преобразованием вида сигнала или его информационного параметра. Для этого в составе АЦП или на его входе должен присутствовать соответствующий аналоговый преобразователь.

Выходной дискретный сигнал АЦП представляется в виде цифрового n -разрядного (двоичного, десятичного, двоично-десятичного и др.) цифрового кода.

АЦП различают по характеру формирования эталонного значения измеряемой величины, форме представления результата измерения,

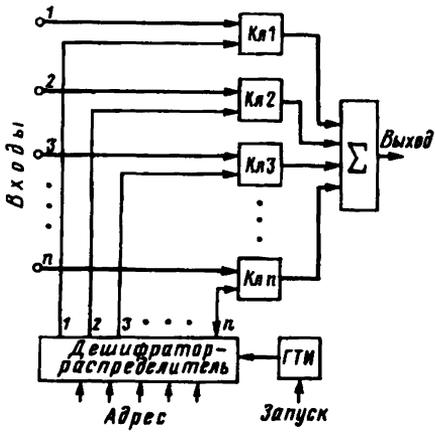


Рис. 4.13. Схема бесконтактного коммутатора

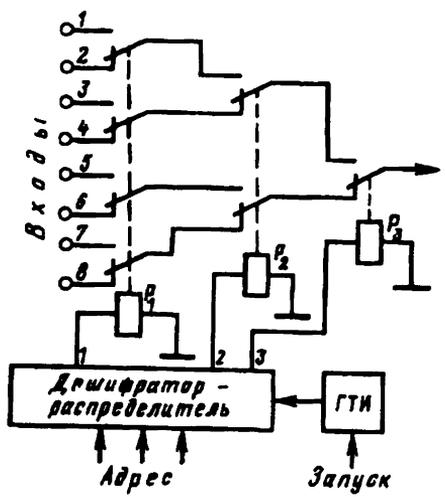


Рис. 4.14. Схема контактного пирамидального коммутатора

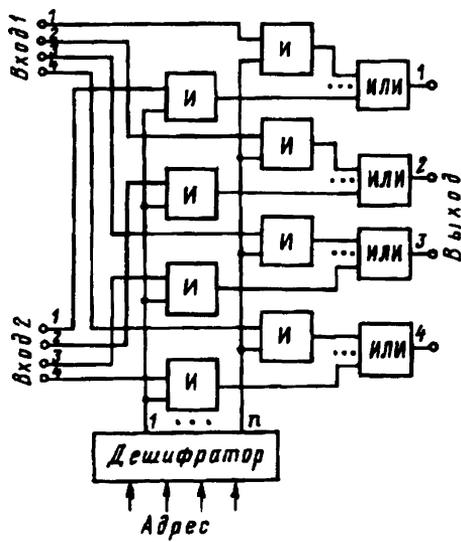


Рис. 4.15. Схема мультиплексора

типу измеряемой величины, а также по своим характеристикам, свойствам и конструктивному оформлению.

Аналого-цифровое преобразование связано с дискретизацией по времени и квантованием по уровню измеряемого (преобразуемого) параметра входного сигнала АЦП.

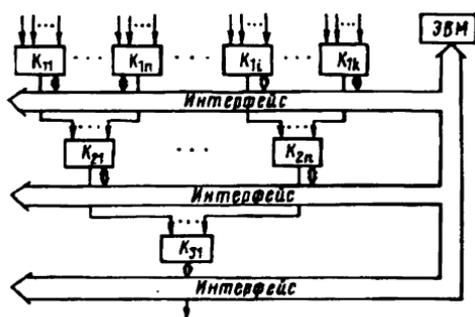


Рис. 4.16. Многоступенчатый программируемый коммутатор

Аналого-цифровое преобразование предусматривает выполнение следующих основных процедур:

- формирования эталонных значений преобразуемого параметра сигнала $\{S_i\}$, соответствующих уровням квантования;

- отождествления текущего значения параметра $S(t)$ с одним из уровней квантования S_i ;

- кодирования результатов преобразования — образования кодовой комбинации уровня квантования K_i , отождествленного с текущим значением $S(t)$;

- представления результата в удобной для последующего использования форме и выдача результата.

Обобщенная структурная схема АЦП представлена на рис. 4.17. Она содержит аналоговый преобразователь АП, осуществляющий промежуточное преобразование измеряемого сигнала $X(t)$ в его аналог $S(t)$, устройство формирования образцовых мер уровней квантования (М), идентификатор (ИД), отождествляющий значение $S(t)$ с образцовыми мерами, и кодирующее устройство (КУ), формирующее кодовое слово выбранной меры — значение параметра преобразуемого сигнала.

Способы формирования образцовых мер уровней квантования разделяются на три основные группы:

- последовательное уравнивание, когда образцовая мера образуется за несколько тактов путем набора фиксированных единичных (равных или неравных) мер;

— следящее уравнивание, когда образцовая мера образуется путем последовательного уравнивания при первом преобразовании, а при последующих преобразованиях отслеживаются только изменения параметра;

— считывание, когда одновременно за один такт осуществляется формирование образцовых мер всех уровней квантования и идентифицируется результат преобразования.

Способ последовательного уравнивания может быть реализован с использованием одинаковых единичных образцовых мер (развертывающее уравнивание) и различных, но пропорциональных единичных образцовых мер (поразрядное уравнивание).

Временная диаграмма развертывающего уравнивания показана на рис. 4.18. Образование уровней квантовая осуществляется путем постепенного наращивания образцовой меры S_i на фиксированные одинаковые величины, равные шагу квантования ΔS . Численное значение i -го уровня квантования равно числу приращений, т.е. $S_i = \Delta S i$.

Время измерения $T_{изм}$ зависит от времени единичного приращения τ и значения измеряемого параметра, т.е. $T_{изм} = \tau i$.

Примером АЦП последовательного уравнивания может служить преобразователь напряжения постоянного тока (рис. 4.19). Схема преобразователя напряжение — код содержит генератор уровней квантования, формирующий ступенчатое образцовое напряжение с шагом ΔU ; компаратор (нуль-орган), сравнивающий значения измеряемого $U_x(t)$ и образцового напряжения $U_i(t)$; генератор импульсов стабильной частоты; счетчик

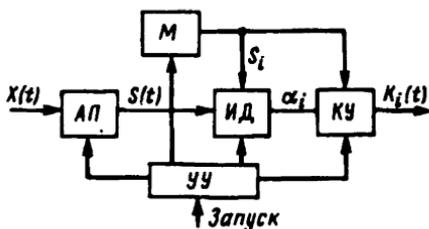


Рис. 4.17. Обобщенная схема АЦП

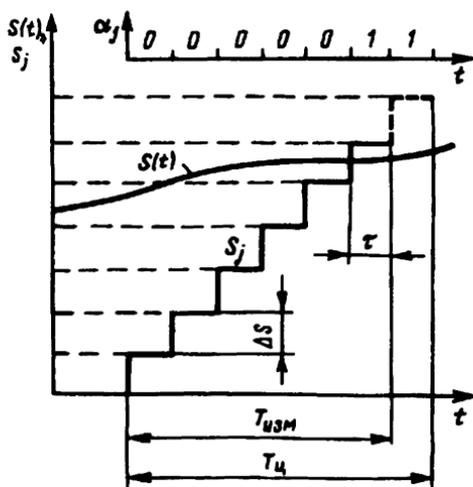


Рис. 4.18. Диаграмма развертывающего уравнивания

импульсов; электронный ключ, управляемый компаратором; кодер, формирующий и выдающий код (цифру) результата измерения; устройство управления.

Результат измерения имеет вид

$$U_x(t) = \Delta U \cdot i ,$$

где i — число импульсов, полученных счетчиком за время измерений.

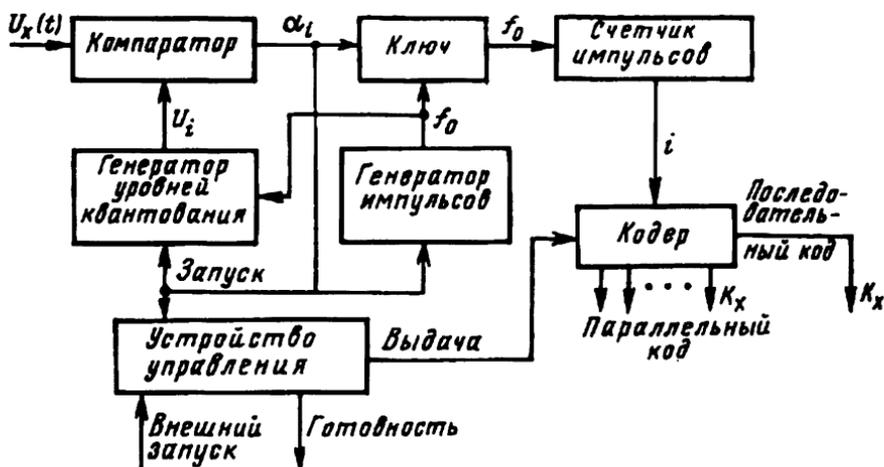


Рис. 4.19. Схема преобразования напряжение — код

Быстродействие АЦП этого типа в зависимости от числа ступеней квантования достигает 10^2 — 10^4 преобразований в секунду, а их погрешность составляет 0,002 — 0,1%.

Поразрядное уравнивание также предусматривает ступенчатое формирование образцовой величины, но ступени $\Delta S(j)$ различаются по величине в течение периода преобразования. Между $\Delta S(j)$ обычно обеспечивается соотношение типа $\Delta S(j) = \Delta S(j-1)/2$. При этом в каждый тактовый момент j времени преобразования в зависимости от результатов сравнения $\alpha(j)$ измеряемой $S(t)$ и образцовой величины $S(j)$ помимо очередного приращения $S(j-1)$ на ступень $\Delta S(j)$ может происходить ее уменьшение на ступень предыдущего такта $\Delta S(j-1)$. Результат сравнения $\alpha(j) = 0$ при $S(j) > S(t)$ и $\alpha(j) = 1$, если $S(j) \leq S(t)$. Вычитание ступени $\Delta S(j-1)$ происходит при $\alpha(j-1) = 0$. Преобразование осуществляется за фиксированное число тактов $j = 1, 2, \dots, n$. Ступень последнего такта равна порогу квантования: $\Delta S(n) = \Delta S$.

Таким образом, степень каждого такта имеет размерность (вес) $\Delta S(j) = \Delta S \cdot 2^{n-j}$, а результат преобразования — отсчет $S_{отс}$ — определяется выражением

$$S_{отс} = \Delta S \sum_{j=1}^n \alpha(j) 2^{n-j}$$

и может быть записан в виде двоичного кода $K_S = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$.

Временная диаграмма поразрядного уравнивания на примере измерения напряжений приведена на рис. 4.20. Быстродействие АЦП этого типа достигает $10^5 - 10^6$ преобразований в секунду.

АЦП следящего уравнивания осуществляют постоянное отслеживание измеряемой величины $S(t)$. Изменение образцовых уровней квантования осуществляется подобно последовательному уравниванию без фиксированного периода измерения.

На каждом j -м шаге уравнивания происходит увеличение S_{j-1} на ΔS , если $S_{j-1} < S(t)$, ($\alpha_{j-1} = 1$), или уменьшение на ΔS , если $S_{j-1} \geq S(t)$, ($\alpha_{j-1} = 0$).

Значения α_{j-1} управляют работой реверсивного счетчика числа импульсов (текущих значений образцовых уровней квантования), переключая его на сложение при $\alpha_{j-1} = 1$ или вычитание при $\alpha_{j-1} = 0$. Текущее значение содержимого счетчика $n(j)$ определяет текущее значение измеряемой величины: $S(t) = \Delta S \cdot n(j)$.

АЦП подобного типа обладают высоким быстродействием, однако способны накапливать ошибки (сбои) преобразования.

Временная диаграмма АЦП следящего уравнивания приведена на рис. 4.21.

АЦП считывания характеризуется тем, что измеряемая величина $S(t)$ сравнивается сразу со всем набором образцовых уровней квантования S_i , $i = \overline{1, m}$. Результат отсчета $S_{отс}$ принимается равным S_i , S_{i-1} или $(S_i + S_{i-1}) / 2$ в зависимости от принятого правила иденти-

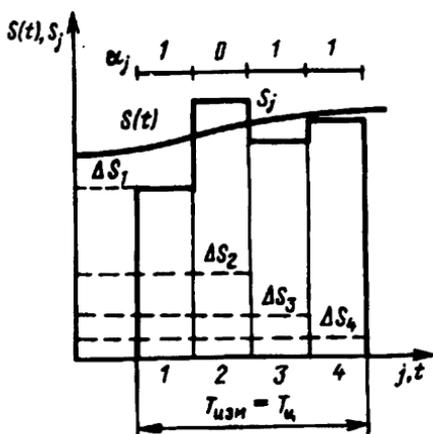


Рис. 4.20. Диаграмма поразрядного преобразования

фикации. Здесь S_i и S_{i-1} — две смежные по уровню образцовые меры ($S_i - S_{i-1} = \Delta S$), результаты сравнения с которыми измеряемой величины $S(t)$ принимают значения $\alpha_i = 0$ и $\alpha_{i-1} = 1$ при $S_i \geq S(t) > S_{i-1}$.

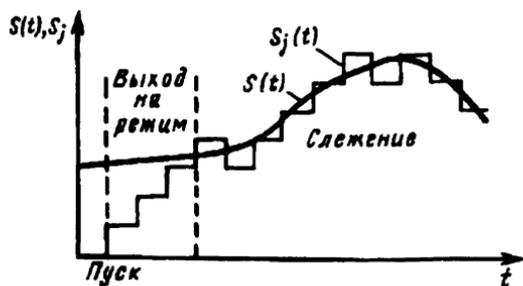


Рис. 4.21. Диаграмма следящего уравновешивания

Схема АЦП считывания представлена на рис. 4.22. Преобразование в таких АЦП осуществляется за один такт. Практическое применение АЦП считывания связано с проблемой обеспечения стабильности большого числа образцовых уровней квантования S_i .

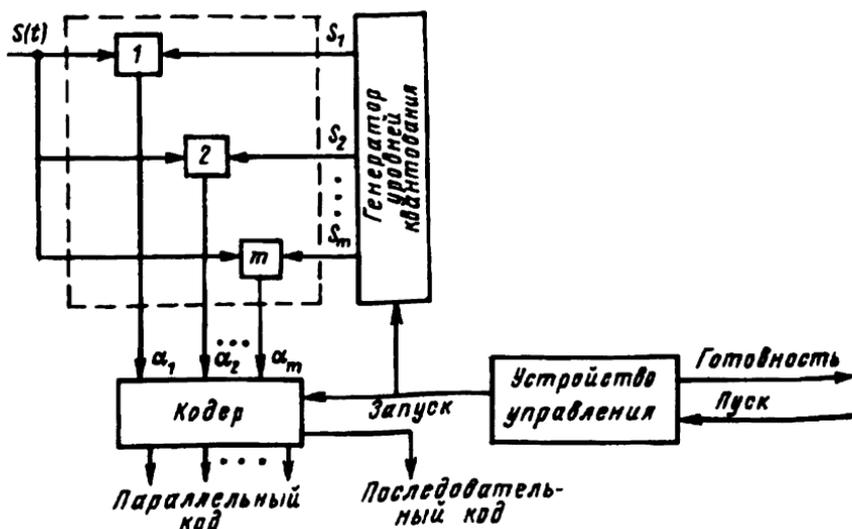


Рис. 4.22. Схема АЦП считывания

Частота преобразования этих АЦП достигает 100 — 200 МГц. Однако точность их составляет 0,5 — 1% и зависит от числа образцовых мер.

Аналого-цифровые преобразователи, используемые в АСИ, выполняются в виде приборов — цифровых вольтметров, мультиметров, частотомеров и модулей.

Характеристики некоторых из АЦП в модульном и приборном исполнении приведены в табл. 4.9.

Устройство управления (УУ) измерительной системы (канала) обеспечивает взаимодействие отдельных элементов, задание режима опроса датчиков, установление диапазонов измерений, задержек на устранение переходных процессов, сопряжение с внешними системами.

Различают УУ с жесткой и гибкой (программируемые УУ) программой работы, а также комбинированные УУ. В современных АСИ все большее распространение получают микропроцессорные УУ.

В качестве самостоятельных или объединенных с другими элементами в АСИ могут входить времязадающие устройства (таймеры) и блоки буферной памяти. Последние служат целям согласования скорости работы измерительных трактов и систем передачи или обработки данных.

Самостоятельную группу цифровых преобразователей образуют так называемые цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), в которых входной сигнал представлен в цифровой форме, а выходной — в аналоговой. В измерительных системах ЦАП используются как генераторы образцовых сигналов АЦП и устройств встроенного контроля (калибраторов) измерительных трактов, а также в качестве средств выдачи унифицированных электрических и иной физической природы сигналов, используемых непосредственно или с промежуточным преобразованием для управления аналоговыми исполнительными механизмами и устройствами объектов управления и испытания или средств отображения и регистрации информации самих измерительных систем.

Вход ЦАП — цифра (код) представляется в двоичной, двоично-десятичной, десятичной, восьмеричной форме или в виде последовательности импульсов, число которых задает значение кода (цифры N). Выходы ЦАП представляют собой напряжения (токи), временные интервалы, частоту X_N .

Уравнение преобразования ЦАП имеет вид

$$X_N = \beta N + X_0,$$

где N — числовое значение кода; β — коэффициент преобразования; X_N — выходная величина, а X_0 — ее постоянная составляющая (например, минимальное или максимальное значение X_N).

Таблица 4.9

ХАРАКТЕРИСТИКИ АЦП

Тип прибора-модуля	Измеряемая величина						Время измерения	Разрядность	Тип интерфейса	Число каналов
	Напряжение		Ток		Сопротивление					
	Диапазон измерений, В	Погрешность	Диапазон измерений, А	Погрешность	Диапазон измерений, Ом	Погрешность				
Щ 1612	$10^{-3}-10^3$	0,001-0,005	—	—	—	—	2000 мс	—	КОП	—
Щ 68014	$10^{-7}-10^3$	0,001-0,005	$10^{-3}-1$	0,02-0,005	$10^{-6}-10^7$	0,02 - 0,005	40-250 мс	—	—	—
Ф 4881	± 1	0,003-0,02	—	—	—	—	100 мкс	—	КОП	—
Щ 300	$10^{-6}-10^3$	0,05-0,02	$10^{-7}-1$	0,1-0,02	10^2-10^{12}	0,1 - 0,002	0,04-4 с	—	—	—
АЦП-П	+5	—	—	—	—	—	100 мс	13 +знак	КАМАС	32
ФК-71/1	± 10	—	—	—	—	—	0,08 мс	12 +знак	КАМАС	2
ФК-4809	± 5	—	—	—	—	—	0,01 мс	9 +знак	КАМАС	2
АЦП-И	0 - 0,05	—	—	—	—	—	40 мс	11	КАМАС	16
МВВ А1	± 5	—	—	—	—	—	0,08 мс	11 +знак	И 41	32
МВА	0 - 10	0,002	—	—	—	—	0,01 мс	12	И 41	4
Ф 7247	0 - 10	—	—	—	—	—	0,04 мс	12	И 41	1

Если X_N представляет собой напряжение, а U_{\max} и N_{\max} — максимальные значения выходного напряжения и соответствующее ему значение кода, $X_0 = U_{\min}$, то $\beta = (U_{\max} - U_{\min}) / N_{\max} = \Delta U$, где ΔU — шаг квантования.

Для входного n -разрядного кода с основанием α ($\alpha = 2, 8, 10, \dots$) $N_{\max} = \alpha^n - 1$, и выражение для U_N имеет вид

$$U_N = (U_{\max} - U_{\min}) \sum_{i=1}^n k_i \alpha^{i-1} / (\alpha^n - 1).$$

Здесь k_i — значение i -го разряда кода, $k = 0, 1, \dots, \alpha - 1$.

Принцип работы ЦАП заключается в суммировании ряда однородных, взвешенных по определенному закону физических величин либо в делении некоторой опорной эталонной физической величины на соответствующий входному коду коэффициент.

В современных системах применяют преобразователи кодов в разнообразные физические величины (обычно электрические): ток, напряжение, сопротивление, проводимость, длительность импульса, период, фазу, частоту и т.п. ЦАП могут работать по принципу прямого преобразования кода в аналоговую величину либо с использованием промежуточного преобразования.

Подавляющее большинство современных ЦАП преобразует входной n -разрядный двоичный код в сумму эталонных разрядных токов I_i с весовыми коэффициентами 2^i с последующим преобразованием суммы токов в выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ посредством операционного усилителя (ОУ).

Используются также ЦАП, в которых применяются делители напряжения. Они представляют собой резисторные сетки сопротивлений, управляемые ключами по сигналам, соответствующим значению кода.

На рис. 4.23 показана резисторная сетка двоичного кода, в которой подключение i -й разрядной цепи формирует выходное напряжение $U_i = E 2^{n-i-1}$, а при подаче кода N выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ равно $U_{\text{вых}} = (E / 2^n) N$.

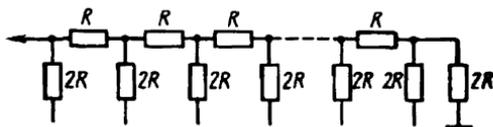


Рис. 4.23. Резисторная сетка двоичного кода

Аналогичная сетка для двоично-десятичного кода приведена на рис. 4.24. Погрешность весовых ЦАП не превышает десятых долей процента.

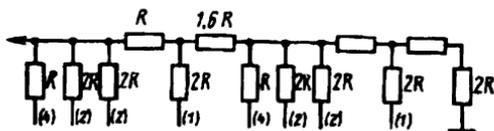


Рис. 4.24. Резисторная сетка двоично-десятичного кода

Другой тип ЦАП — так называемые время-импульсные преобразователи, в которых цифровой код на входе трансформируется в пропорциональное ему среднее значение напряжения на выходе. Выходные сигналы имеют форму импульсов постоянной частоты $1/T$ и амплитуды U_0 , но их длительность τ пропорциональна значению кода N . Погрешность таких ЦАП составляет 0,1 — 0,3%.

Характеристики некоторых ЦАП в блочном и модульном исполнении приведены в табл. 4.10. Здесь же приведены данные по зарубежным аналогам перспективных прецизионных и программируемых ЦАП с микропроцессорами.

4.4.3.

Измерительные комплексы и системы

Тенденции дальнейшего развития, стандартизации и унификации измерительной аппаратуры заключаются прежде всего в переходе на агрегатно-модульные принципы построения измерительной аппаратуры, обеспечении аппаратной, метрологической и программной совместимости средств измерений, возможности быстрого изменения и наращивания структур и информационной мощности приборов и систем. При этом усилия направляются как на создание агрегатированных комплексов и систем, так и на разработку «интеллектуальных» приборов с повышенными показателями качества и метрологическими характеристиками.

В иерархии существующего и разрабатываемого оборудования основными ступенями являются модули, частичные блоки, блоки, приборы, измерительные комплексы, субкомплексы, измерительные системы и измерительно-вычислительные комплексы.

Модули — это устройства, конструктивно расположенные на одной или нескольких печатных платах стандартного размера, выполняющие, как правило, одну или несколько определенных функций измерения,

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦАП

Тип прибора-модуля	Выходная величина	Диапазон измерений	Погрешность	Быстродействие, с	Число разрядов
Ф7046	Напряжение постоянного тока	0 - 10 В	0,013- 0,015	0,02 - 0,5	—
П321	Напряжение постоянного тока Постоянный ток	10^{-5} - 10 В	0,004	3 - 5	—
		10^{-9} - 10 А	0,006	3 - 5	—
4810/2	Напряжение постоянного тока	9,995 В	0,06	$2 \cdot 10^{-5}$	—
Р3045 ГЗ-110 Ф7090	Сопротивление Частота Напряжение постоянного тока	$1 - 10^6$ Ом	0,01	1	—
		$0,01 - 2 \cdot 10^{-6}$ Гц	$3 \cdot 10^{-7}$	1 период +0,01	—
		$10^{-5} - 1000$ В (0,02 - 100 кГц)	0,03 - 0,1	2 - 5	—
2 ЦАП (2 канала)	Напряжение постоянного тока	0 - 5 В	—	$0,01 \cdot 10^{-3}$	10 (двоичные)
ФК-70		± 10 В	—	$0,01 \cdot 10^{-3}$	14 + знак (двоичные)
ЦАП с оптронной развязкой		$\pm 6, \pm 16, \pm 32$ В	—	$0,2 \cdot 10^{-3}$	16 + знак (двоичные)
Прецизионные мультикалибраторы типа 4000 («Дейтрон»)	Постоянное напряжение Постоянный ток Сопротивление	$10^{-6} - 10^3$ В	0,001	$10^{-4} - 1$	4 — 7 (десятичные)
$10^{-9} - 10^0$ А		0,005			
$10^{-3} - 10^7$ Ом		0,005			
Программируемые генераторы типа 4415 («Хьюлетт-Паккард»)	Частота	$10^{-2} - 10^7$ Гц	10^{-5}	2	6 — 7 (десятичные)

преобразования, выдачи, коммутации непрерывных сигналов, а также ввода и вывода дискретных сигналов. В состав модуля входят узлы системного обмена с магистралью, расположенной в каркасе (крейте), а также промежуточные источники питания. Конструкция модуля рассчитана на размещение и закрепление в определенном типе каркаса. Электропитание осуществляется от внешних источников. Модификации базовых модулей различаются типом интерфейса, конструктивными и эксплуатационными особенностями.

Частичные блоки — это устройства, предназначенные для преобразования входных или выходных сигналов элементов АСИ. Они применяются в тех случаях, когда необходимые электрические сигналы по своим параметрам (мощности, напряжению, току и др.) не могут быть реализованы в модульном исполнении. В эту подгруппу входят измерительные преобразователи. Частичные блоки используются как средства сопряжения унифицированных измерительных приборов, комплексов и систем с объектом измерения.

Блок представляет собой функционально и конструктивно самостоятельную часть более сложных элементов. Он может быть выполнен в модульном исполнении и в виде отдельной конструктивной единицы (блок питания, блок индикации, коммутации и т.п.).

Приборы представляют собой устройства, заключенные в индивидуальный корпус, имеющий автономный источник питания и лицевую панель, на которой расположены органы управления и индикации ручного режима. Функциональная часть прибора может состоять из тех же узлов, которые используются в модулях. В приборах возможно программирование их работы и сопряжение с ЭВМ.

Метрологические характеристики приборов, как правило, выше, чем у модулей. Это достигается за счет применения структурных, алгоритмических и конструктивных решений, которые по тем или иным причинам не могут быть реализованы в модульном исполнении.

Приборы могут иметь в своем составе микропроцессор или ЭВМ совместно с аппаратурой отображения и регистрации информации.

Измерительный комплекс (ИК) представляет собой разновидность приборов с увеличенным числом измерительных каналов, типов измеряемых величин (типов ПП — термопар, тензодатчиков и т.п.), функций обработки, отображения и регистрации данных, с большими возможностями программирования работы и сопряжения с другими элементами АСИ. Отличительным признаком ИК является то, что они предназначены исключительно для решения задач измерения. Аппаратная часть комплекса может быть представлена одним или несколькими приборами на основе унифицированных блоков или модулей. Их набор может быть фиксированным и предназначенным для выполнения типовых задач либо переменным и рассчитанным на определенные виды и объекты измерений. Измерительные комплексы на базе стан-

дартных приборов агрегируются в стойки. В них же устанавливаются средства системного обмена (интерфейсы, блоки сопряжения). ИК на базе модулей объединяются в каркасах (крейтах), которые размещаются в стойках или тумбах. Модули каркасов и каркасы стоек соединены интерфейсами. Лицевые панели снабжены органами индикации и управления.

Субкомплексы (СК) представляют собой совокупность измерительной аппаратуры, обеспечивающей обслуживание территориально или функционально обособленных объектов, процессов, подпроцессов с единым управлением и информационным выходом в смежные системы и другие уровни АСИ или систем управления и обработки данных испытаний.

Субкомплексы разделяются на сосредоточенные (расстояние между объектами до 2 м), локализованные (до 20 м) и рассредоточенные (свыше 20 м), одноконструктивные и многоконструктивные, комплексы с жесткими, гибкими и программируемыми режимами и алгоритмами, наземные, бортовые, стационарные, мобильные и др.

Субкомплексы обеспечивают различные виды взаимодействия систем управления и обработки экспериментальных данных с объектом и средствами испытаний. Поэтому они содержат в своем составе не только измерительную аппаратуру, но и оборудование ввода дискретных сигналов, выдачи на объекты аналоговых и дискретных сигналов для управления исполнительными механизмами, средствами автоматики, системами управления и контроля объекта испытаний, регулирования параметров, средств испытаний, объекта испытаний и для других целей.

Функциональными элементами СК являются отдельные устройства, приборы (ИП, АЦП, ЦАП, коммутаторы и т.п.), измерительные комплексы, средства обработки, хранения, отображения и регистрации данных и другое оборудование.

Основой СК является системная магистраль (интерфейс типа ОШ, И41, КОП, ИЛПС) с контроллером магистрали. Контроллер магистрали осуществляет управление устройствами, подключенными к интерфейсу, и взаимодействие СК с внешними ЭВМ, управляющими вычислительными комплексами и другими субкомплексами.

В общем случае магистраль СК может иметь несколько контроллеров (например, для сопряжения с несколькими СК или удаленными функциональными элементами). Однако управление магистралью в конкретный момент времени осуществляет один контроллер.

Сопряжение функциональных элементов СК с магистралью осуществляется через адаптеры. Помимо функций согласования с интерфейсом, адаптеры могут выполнять ряд дополнительных функций диагностики, контроля передаваемой информации, преобразования формата данных. Адаптеры конструктивно выполняются в виде модулей

каркасов, узлов или блоков, входящих в подключаемые функциональные блоки. В состав СК может входить один или несколько микропроцессоров с ОЗУ и ПЗУ (микро-ЭВМ), а также оперативно-диспетчерское оборудование (ОДО), также подключаемое к магистрали СК. При наличии процессора контроллер магистрали СК входит в состав процессорного модуля как функциональный узел. Микро-ЭВМ и ОДО могут входить и в состав функциональных элементов СК. ОДО может содержать устройства (пульта) ручного ввода (клавиатуры, регулировочные органы) и индикации состояния СК, дисплейные терминалы, системы отображения, устройства документирования, графического представления и накопления информации на машинных носителях.

Обобщенная структура СК представлена на рис. 4.25.

Особое место занимают одноконструктивные (крейтовые) сосредоточенные и локальные СК. Выпускаемые в настоящее время одноконструктивные СК предусматривают различные виды унификации элементов на конструктивном, электрическом, логическом, метрологическом и программном уровнях. Такой подход позволяет создать практически неограниченную номенклатуру функциональных элементов и объединений их в системы различной сложности, конфигурации и технических возможностей.

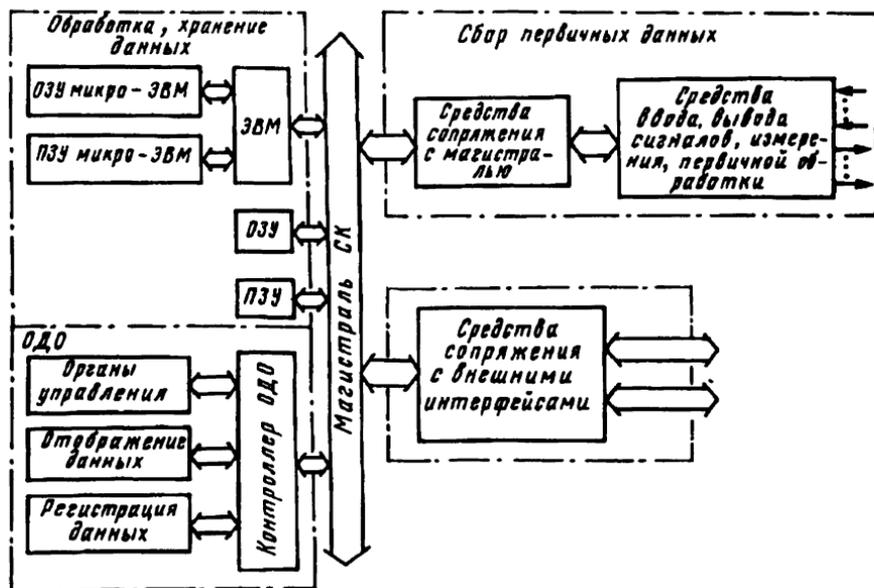


Рис. 4.25. Обобщенная схема субкомплекса

Примерами сосредоточенных и локальных СК могут служить комплексы технических средств КАМАК, ВЕКТОР, ЛИУС, АСВТ-М, Hewlett Packard и др.

Устройства (модули) системы КАМАК собираются в блоках размером 221x305-17,2 М мм (где М = 1,2,3...), имеющих переднюю панель с разъемами для внешних и межблочных соединений, с органами управления и сигнализацией. В стандартном крейте имеется 24 одинаковых места, на которые модули могут устанавливаться в произвольном порядке. Питание крейта осуществляется от отдельного блока питания, устанавливаемого сзади крейта. Крейты объединяются (до семи штук) в стойку. Сопряжение устройств и крейтов осуществляется через внутривлочные и межблочные интерфейсы. Магистраль систем КАМАК и ВЕКТОР представляет систему магистральных шин, проходящих через одномерные контакты всех разъемов каркаса, и индивидуальных выводов, соединяющих каждое место (разъем) с контроллером каркаса.

Состав крейтов определяется соответственно целям и задачам конкретных типов испытаний и объектов.

Комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем (КТС ЛИУС) предназначен для построения АСУ ТП с малым и средним количеством регулируемых и контролируемых параметров.

Рассосредоточенные СК отличаются от сосредоточенных и локальных типом используемых интерфейсов и способом объединения и организации взаимодействия функциональных элементов. При этом возможны три варианта структур: магистральная — на основе, например, последовательного магистрального интерфейса ИЛПС; радиальная — на основе системы радиальных последовательных (ИРПС) или параллельных (ИРПР) интерфейсов, объединяемых единым контроллером (устройством межмашинной связи или ЭВМ); комбинированная — на основе сосредоточенных, локальных или рассредоточенных магистралей и радиальных интерфейсов.

По способу управления комплексы подразделяются на две группы — комплексы с жесткой программой работы (непрограммируемые) и комплексы с гибкой программой работы (программируемые). Непрограммируемые комплексы могут осуществлять как отдельные простейшие измерительные операции, так и достаточно сложный, но ограниченный набор процедур, заложенных (встроенных) заранее в процессе изготовления аппаратуры. Управление их работой предполагает внешнее выполнение недостающих операций и предварительную настройку аппаратуры на определенный режим, программу работы, не изменяемую в процессе функционирования.

В программируемых комплексах изменение программы работы осуществляется посредством ввода или выбора новой программы в процессе функционирования комплекса. При этом могут изменяться про-

цессы обработки информации, общения человека с машиной, формирования управляющих воздействий, массивов данных либо структура аппаратных средств.

Высшим уровнем агрегатирования измерительной аппаратуры является *измерительная система*. Измерительная система содержит в своем составе несколько измерительных комплексов или субкомплексов.

Системы такой сложности, как правило, создаются для решения целого ряда задач практического назначения, таких, например, как управление и контроль технологических процессов, в том числе и процесса испытаний, регулирование параметров технологического оборудования (средств испытаний), обработка экономической, научно-технической и испытательной информации. Поэтому измерительные системы являются по существу проблемно ориентированными системами управления и обработки данных, в которых центры управления (ЦУ) или обработки данных (ЦОД) являются управляющими элементами.

Выпускаемые в настоящее время измерительные системы на основе унифицированных ИК и СК получили наименование *измерительно-вычислительных комплексов (ИВК)*, которые содержат в своем составе один или несколько измерительных комплексов или субкомплексов и управляющий вычислительный комплекс (УВК), представляющий собой совокупность одной или нескольких стандартных ЭВМ с набором также стандартных периферийных устройств, терминалов, средств отображения и регистрации информации. При наличии ЭВМ в составе используемых субкомплексов такие «интеллектуальные» субкомплексы могут выполнять роль УВК.

Степень универсальности ИВК зависит от состава входящего в него оборудования.

Наибольшее число выпускаемых ИВК, равно как наборы средств сопряжения серийных мини- и микро-ЭВМ, ориентированы на ввод и выдачу определенной совокупности унифицированных электрических аналоговых и дискретных (тока, напряжения, сопротивления), частотных (частота, фаза, временные интервалы) и кодированных сигналов. Поэтому возможность их непосредственного применения ограничена теми объектами, входные и выходные сигналы которых удовлетворяют по своему составу и характеристикам входным и выходным сигналам ИВК. В остальных случаях такие ИВК могут использоваться в качестве ядра системы, дополненного средствами сопряжения с объектом, учитывающими его специфику по виду и характеристикам сигналов, расположению и другим факторам.

Существуют и специализированные ИВК, содержащие измерительные преобразователи сигналов определенных датчиков (термоэлектрических, термометров сопротивления, реохордов и потенциометров,

трансформаторных и др.). Характеристики современных универсальных ИВК приведены в табл. 4.11.

Кроме измерения и выдачи сигналов, эти ИВК осуществляют простейшие виды обработки сигналов: определение среднего значения за интервал или период колебаний, определение действующего значения периодического сигнала, вычисление точного значения за период помехи и др.

4.5. Автоматизация сбора и обработки данных

4.5.1. Организация сбора и обработки экспериментальных данных

Сбор и обработка информации об объекте испытаний и состоянии системы испытаний создают основу для решения задач управления и получения требуемых результатов испытаний.

Организация, средства и методы сбора и обработки информации зависят от типа объекта и целей испытаний, вида потребителей информации и решаемых ими задач. Их различия влияют на состав и объем экспериментальных данных (ЭД), способы измерения, передачи, регистрации, методы обработки и формы представления информации, требования к точности измерения, верности передачи, быстродействию и т.п. Однако состав основных подпроцессов и процедура сбора и обработки информации для различных систем испытаний практически одинаковы.

Сбор и обработка информации в процессе испытаний включает следующие основные этапы:

- сбор первичных данных, заключающийся в получении информации с объектов испытания и управления, и подготовка к последующему использованию, измерению или передаче;
- измерение, т.е. получение численных значений параметров объекта путем преобразования аналоговых величин в цифровые коды;
- накопление и хранение данных, т.е. регистрация данных и результатов их обработки на человекочитаемых и машинных носителях информации с целью ее последующей передачи или обработки на ЭВМ;
- передача данных;

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИВК

Физическая величина	Диапазон измерений		Число разрядов двоичных (десятичных)	Точность	Быстродействие, с	Измерительное устройство
	по амплитуде	по частоте, Гц				
$U_i(t), \bar{U}_{1..2}, \bar{U}_-, \bar{U}_m, \bar{U}$	Измерение			0,1	10^{-6}	Быстродействующий многопредельный АЦП с памятью
	$10^{-4} - 10^3$ В	$0,01 - 2 \cdot 10^4$	$10 - 12/3$	0,2		
$I_i(t), \bar{I}_{1..2}, \bar{I}_-, \bar{I}_m, \bar{I}$	$10^{-7} - 1$ А	$0,01 - 2 \cdot 10^4$	$10 - 12/3$	0,1	10^{-6}	
				0,2		
$R_i(t), \bar{R}_{1..2}$	$1 - 10^7$ Ом	$0,01 - 2 \cdot 10^4$	$10 - 12/3$	0,1	10^{-6}	
Точное измерение						
U	$10^{-6} - 10^3$ В	—	$16 - 20/5 - 6$	0,01	$4 \cdot 10^{-2}$	
I	$10^{-9} - 1$ А	—	$16 - 20/5 - 6$	0,02	$4 \cdot 10^{-2}$	
R	$10^{-2} - 10^7$ Ом	—	$16 - 20/5 - 6$	0,02	$4 \cdot 10^{-2}$	
F	—	$10^2 - 10^7$	$20 - 24/7$	$10^{-5} - 10^{-1}$	$10^{-3} - 1$	Частотомер
T	$10^{-2} - 100$ с	—	$20 - 24/7$	$10^{-5} - 10^{-1}$	$200 - 10^{-1}$	Периодомер
Выдача сигналов						Быстродействующий ЦАП с памятью
$U_i(t), U_-$	$10^{-4} - 10$ В	$0,01 - 2 \cdot 10^4$	$10 - 12/3$	0,1	10^{-6}	
$I_i(t), I_-$	$10^{-8} - 10^{-2}$ А	$0,01 - 2 \cdot 10^4$	$10 - 12/3$	0,1	10^{-6}	
U	$10^{-4} - 10$ В	—	$16/5$	0,005	10^{-1}	Прецизионный ЦАП
I	$10^{-7} - 10^{-2}$ А	—	$16/5$	0,01	10^{-1}	
F	$0,01 - 10$ Гц	$0,01 - 10^{-7}$	$20 - 24/7$	10^{-5}	1	Синтезатор частоты
T	$0,01 - 10$ с	$100 - 10^{-7}$	$20 - 24/7$	10^{-5}	1	

— ввод данных в ЭВМ, состоящий в согласовании форм представления сигналов — носителей информации, быстродействия средств регистрации, хранения, передачи и обработки данных и в последовательной выдаче информации в ЭВМ для ее обработки;

— обработка данных в ЭВМ, заключающаяся в выполнении вычислительных, логических, моделирующих процедур по определению статистических характеристик данных, параметров, функциональных зависимостей, состояний, показателей эффективности и качества объекта или средств испытаний. В интересах управления и контроля могут выполняться процедуры оценки и выработки управляющих воздействий, диагностики причин нарушения нормального хода процесса испытаний и прогнозирования технического состояния объекта и средств испытаний;

— выдача данных, заключающаяся в выводе из ЭВМ результатов обработки данных, их регистрации, отображении, документировании или передаче потребителям или другим средствам обработки;

— оценка результатов, т.е. проверка результатов обработки данных, их полноты, верности и соответствия целям испытаний, принятие решений по изменению, повторению эксперимента или программ обработки данных.

Структура сбора и обработки данных зависит от следующих факторов:

- территориальной протяженности объекта и средств испытаний;
- взаимного удаления объекта и средств испытаний от систем обработки данных и потребителей результатов обработки;
- степени автоматизации технических средств и степени участия операторов (персонала) в процессах сбора и обработки;
- характера обработки данных (обработка в реальном масштабе времени и допустимость временных задержек и пакетной обработки);
- возможностей и уровня совершенства используемых средств и методов обработки.

Ряд вариантов структур могут быть получены на основании схемы (рис. 4.26), где выделены этапы сбора первичных данных, измерения, накопления и хранения, передачи данных. Первичная обработка может быть выполнена в различных точках схемы. Данные для обработки могут быть переданы с помощью специальных средств передачи данных либо транспортировкой машинных носителей (магнитных лент, перфолент, перфокарт и т.п.).

Передача информации может осуществляться в реальном времени (сплошные линии) или прерывисто, с некоторой задержкой (пунктирные линии), в аналоговой (жирные линии) или цифровой (тонкие линии) форме.

По степени удаления элементов системы сбора и обработки (ССО) от объекта испытаний и друг от друга, а также по принципу распре-

деления идентичных функций различают, соответственно, сосредоточенные (местные), локальные (дистанционные), рассредоточенные (телесистемы) и централизованные и децентрализованные структуры. Централизация и децентрализация может относиться ко всей ССО или ее отдельным подсистемам.

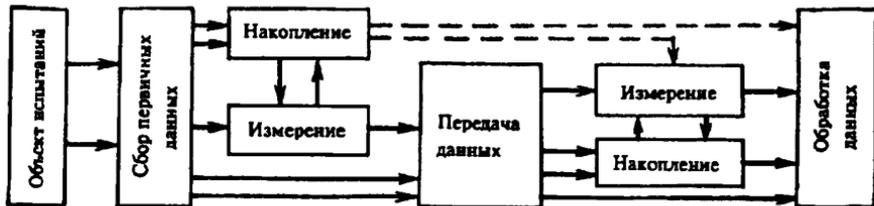


Рис. 4.26. Схема сбора ЭД

Сосредоточенные системы характерны для небольших испытательных стендов и машин, когда основное оборудование, включая ЭВМ, располагается на удалении 2 — 10 м от объекта испытаний. При этом для связи с объектом и элементами системы не применяются специальные средства передачи данных, но не исключается возможность использования внешних, пусть даже удаленных, ЭВМ для расширения вычислительных возможностей ЭВМ системы, которая является основной, поскольку именно она обеспечивает получение результатов обработки данных (рис. 4.27).

В локальных ССО возможны удаление всей или части аппаратуры от объекта испытаний порядка 20 — 100 м и децентрализация некоторых функций. Как правило, это касается сбора первичных данных (подсистема ССД), измерения и обработки данных (подсистема СОД). В системе используются средства дистанционной связи или магистральные последовательные и параллельные интерфейсы. Подобные структуры применяются при наличии нескольких близко расположенных стендов или стенда большой протяженности.

Основу местных и дистанционных систем могут составлять серийно выпускаемые измерительные комплексы, субкомплексы, ИВК либо серийные ми-



Рис. 4.27. Сосредоточенная ССО ЭД

ни- или микро-ЭВМ с комплектом средств сопряжения с объектом. ЭВМ ССО ЭД также могут иметь связь с внешними ЭВМ, используемыми для расширения вычислительных ресурсов системы.

ССО на рис. 4.28,а является полностью децентрализованной. Такой вариант возможен, если данные по каждой подсистеме (стенду) независимы и результаты испытаний не требуют совместной обработки данных по каждой из подсистем. Если это условие не соблюдается, то интеграция может быть достигнута организацией взаимодействия отдельных ЭВМ СОД или введением центральной ЭВМ. На рис. 4.28,б представлены централизованная по обработке и децентрализованная по сбору ССО ЭД.

Испытания сложных объектов, например ЛА в целом, или использование нескольких испытательных стендов требуют организации определенного взаимодействия между информационными массивами отдельных подсистем ЛА, наземного комплекса ЛА или отдельных стендов. Такое взаимодействие необходимо для установления логико-функциональных зависимостей между параметрами объекта испытаний, для исключения недостаточности данных в различных подсистемах по одним и тем же параметрам, процессам, объектам и обеспечения возможности реализации сложных методов обработки и оценки функциональных и статистических зависимостей.

Структура, изображенная на рис. 4.28,в, позволяет решать эту задачу за счет единой системы сбора данных. Две ЭВМ в структуре могут быть использованы как для повышения надежности системы, так и для одновременной обработки данных в различных целях (например, управления и обработки результатов испытаний) или предварительной и полной обработки ЭД.

Другой способ распределения функций обработки и доступа к различным массивам реализует структура на рис. 4.28,г. На основе функционирования централизованной или децентрализованной системы сбора данных формируется единый банк данных, к которому могут иметь доступ различные СОД и органы управления системы испытаний. В структуре две ЭВМ осуществляют предварительную обработку и управление банком данных, а центральная ЭВМ выполняет полную обработку.

Для рассредоточенных систем характерно использование на том или ином уровне специальных систем связи или передачи данных. Возможен также обмен данными посредством транспортировки к местам обработки или передачи данных машинных носителей информации с последующим вводом ее в ЭВМ. В системах испытаний рассредоточенные ССО ЭД используются при проведении совокупности взаимосвязанных испытаний на различных, удаленных друг от друга испытательных стендах. В этом случае происходит распределение функции сбора первичных данных. Распределение обработки данных возможно при использовании удаленных друг от друга ЭВМ (вычислительных центров).

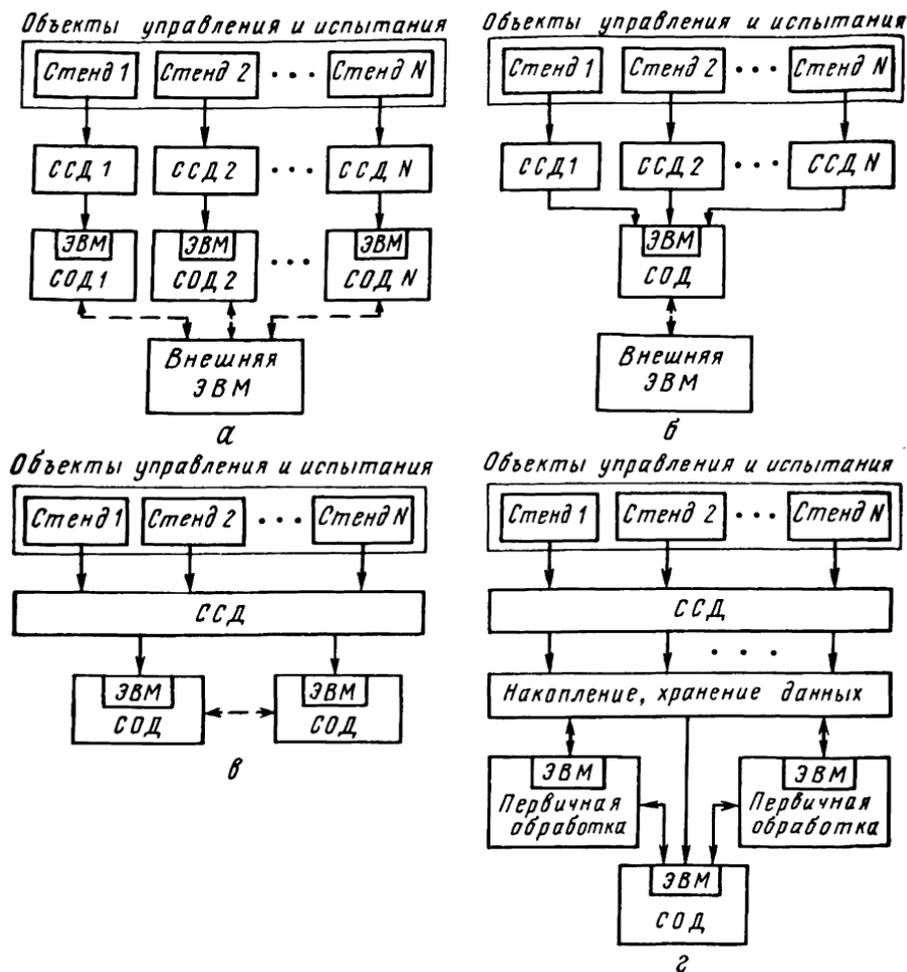


Рис. 4.28. Локальные ССО ЭД:

а – децентрализованная; *б* – централизованная обработка и децентрализованный сбор; *в* – централизованный сбор; *г* – единый банк данных

Структура ССО ЭД для системы испытаний с большой разобцённостью элементов изображена на рис. 4.29.

Здесь представлены три основных тракта сбора ЭД — наземная ССД, бортовая ССД с телеметрическим каналом передачи информации и средствами накопления данных на машинных носителях, а также тракт траекторных измерений — наземная система наблюдения и сбора данных. Обмен информацией между элементами ССО ЭД осуществляется автоматическими системами передачи информации либо неавтоматическими системами передачи информации либо неавтоматическими средствами (пунктирные линии).

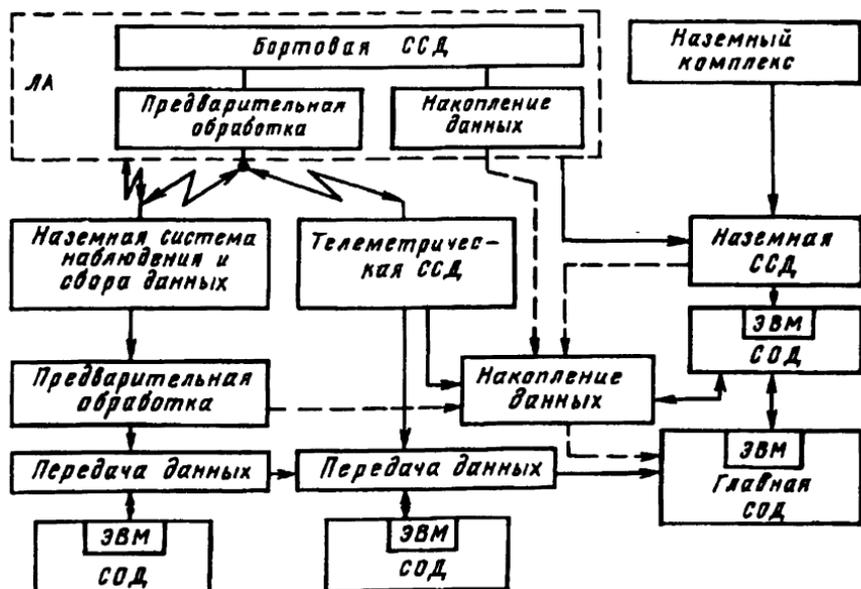


Рис. 4.29. Распределенная ССО ЭД

4.5.2.

Сбор первичных данных

Сбор первичных данных (СПД), или просто сбор данных, заключается в периодическом опросе состояний первичных преобразователей (датчиков) с целью ввода в ССО ЭД и последующего преобразования и измерения параметров сигналов — носителей информации об объекте испытаний или средствах испытаний. При наблюдении необходимых метрологических, энергетических и иного ви-

да требований основная задача сбора данных заключается в обеспечении требуемой оперативности данных при минимальных аппаратных средствах и объеме служебной информации.

Оперативность данных задает требуемую частоту опроса датчиков и определяется исходя из заданной точности измерений или быстродействия управления процессом испытаний.

Точность измерения согласно теореме Котельникова устанавливает максимально допустимый интервал времени Δt_i , через который необходимо производить замеры значений параметров сигналов $x_i(t)$ с частотным спектром $W_i - \Delta t_i \leq 1/2 W_i$. Уменьшение Δt_i приводит к избыточности информации, увеличение — к снижению точности.

Быстродействие управления задается максимально допустимым временем реакции системы t_p на изменение состояния объекта управления. Время реакции учитывает необходимые временные затраты на сбор, измерение параметров состояния объекта управления и контроля $t_{сб}$, передачу данных $t_{пер}$, оценку состояния и принятие решения $t_{реш}$, формирование, доведение и исполнение решения:
 $t_{исп} - \Delta t \leq t_{сб} + t_{пер} + t_{реш} + t_{исп}$.

Уплотнение состоит в использовании одного и того же функционального устройства (АЦП, канала передачи данных, ЭВМ и т.п.) для обслуживания различных параметров, абонентов, задач по данной функции (измерения, передачи или обработки данных). Уплотнение достигается за счет избыточности возможностей уплотняемого средства по определенному виду обслуживания одного или группы потребителей такого обслуживания.

В ССД такая избыточность может быть оценена разностью между требуемой периодичностью опроса датчиков Δt_i и временем обслуживания $\tau_{обсл}$ данных этого датчика в уплотняемом средстве. Уплотнение или объединение (группирование) первичных (неуплотненных) каналов в уплотненный (групповой) канал осуществляется средством уплотнения и группирования. Обычно эту роль выполняют коммутационные устройства (коммутаторы или мультиплексоры). В определенных случаях эту функцию могут выполнять интерфейсы или многоканальные АЦП и ИП.

Поскольку группирование (коммутация) требует определенных временных затрат, то реальная избыточность зависит и от быстродействия устройства группирования $\tau_{гр}$.

В общем случае $\tau_{гр}$ зависит от вида первичных каналов и их числа и имеет две основные составляющие — время переключения (коммутации) и время управления (определения подключаемого канала) $\tau_{гр} = \tau_{пер} + \tau_{упр}$. В системах СПД $\tau_{обсл}$ зависит от времени преобра-

зования $\tau_{\text{пр}i}$, группирования (коммутации) $\tau_{\text{гр}i}$ и измерения $\tau_{\text{изм}i}$, причем учитываются и необходимые выдержки на переходные процессы: $\tau_{\text{обсл}i} = \tau_{\text{пр}i} + \tau_{\text{гр}i} + \tau_{\text{изм}i}$. Число уплотняемых каналов N_y за один цикл сбора данных определяется соотношением

$$N_y \leq \Delta t_{\text{min}} / \sum_{i=1}^{N_y} \tau_{\text{обсл}i}.$$

Здесь Δt_{min} — наименьшее значение Δt_i для всех датчиков, опрашиваемых в данном цикле. Очевидно, что для обеспечения эффективного безыбыточного сбора данных каждый из циклов должен иметь переменную длину и состав измеряемых параметров, причем определение этого состава и порядка опроса должно производиться с учетом Δt_i для каждого датчика и момента времени предшествующего опроса этого датчика.

Реализация такого алгоритма требует сложных аппаратных и программных средств. Поэтому на практике нашли применение некоторые вариации этого предельного случая, различающиеся степенью избыточности и возможностью изменения состава и длительности цикла опроса.

Наиболее проста аппаратная реализация так называемого метода циклического опроса с постоянным числом опрашиваемых параметров N и постоянным временем цикла опроса $T_{\text{ц}}$. Очевидно, что при различных Δt_{iN} здесь будет иметь место временная избыточность,

$$\text{равная } \sum_{i=1}^N (\Delta t_i - \Delta t_{\text{min}}).$$

При одинаковых Δt_i ($\Delta t_i = \Delta t$) избыточность будет равна нулю. Практически это условие не соблюдается, и для уменьшения избыточности информации применяют некоторые конструктивные и алгоритмические методы. В общем случае их реализация зависит от типа устройства группирования. Так, в частности, используется циклический опрос, когда один и тот же датчик за время цикла опрашивается N_i число раз ($N_i = 1, 2, 3, \dots$) через промежутки времени $\Delta t_i \leq \Delta t$.

На рис. 4.30 представлена временная диаграмма цикла. Здесь второй и пятый датчики обслуживаются два раза за цикл опроса, первый обслуживается три раза, а остальные — по одному разу. Конструктивно такая диаграмма может быть получена объединением входов устройства группирования (рис. 4.31). При ограниченном числе входов коммутаторов применяются многоступенчатые коммутаторы, в которых выходы устройств нижнего уровня подключены к входам устройств следующих высших уровней (рис. 4.32). Здесь требуется синхронизация работы коммутаторов различных уровней.

Вторую группу методов опроса составляют адресные методы, когда в каждый момент времени выбор датчика осуществляется по адресу, выдаваемому устройством управления системы уплотнения на основании программы опроса. Эта программа может быть заложена заранее или формироваться в ходе опроса, в зависимости от результатов обработки или хода процесса испытаний. Реализация этого метода возможна при использовании, например, коммутаторов с адресным режимом работы или программируемых коммутаторов. При этом увеличиваются затраты времени на передачу, ввод адреса (программы) и выполнение необходимых переключений. На рис. 4.33 представлена схема двухступенчатого устройства группирования, содержащего программируемые коммутаторы. Схема реализует диаграмму опроса датчиков, показанную на рис. 4.30.

В соответствии с приведенным на рис. 4.33 распределением датчиков по коммутаторам нижнего уровня программы их работы (номера подключаемых входов), реализуемые при обращении к ним устройства управления, имели бы вид: для K_{11} 1,2,3,4,1,2,4; для K_{12} 1,2,3,4,1. Программа коммутатора второго уровня по тактам цикла имела бы вид 1,1,1,1,1,2,2,1,1,2,2,2.

Третью группу составляют комбинированные методы уплотнения, которые сочетают адресный метод, как правило, при выборе отдельных коммутаторов и последовательный циклический опрос подключенной группы датчиков. В этом случае упрощается реализация циклического опроса и снижаются затраты времени на управление.

Адресный опрос датчиков и изменение программы опроса в ходе процесса испытаний порождают еще одну проблему. Она заключается в идентификации данных в групповом канале при разделении каналов — определении принадлежности данных тому или иному источнику. При неизменной программе опроса (наборе типовых программ) кадр (массив) данных группового канала может иметь лишь признак начала кадра (НК) и его типа. Принадлежность отдельных порций данных внутри кадра определяется их позициями в кадре, которые не меняются и заранее известны (рис. 4.34,а).

Если стандартный кадр имеет неполную длину, например начинается не с первой позиции или оканчивается не на последней позиции, то кадр содержит признак конца (КК) и адрес начальной позиции (рис. 4.34,б и в). Этого достаточно для расшифровки кадра.

При произвольной программе опроса помимо признаков начала и конца кадра необходимо указать и адрес (номер) датчика A_i (рис. 4.34,з).

На рис. 4.35 показана структура распределителя информации группового кадра фиксированной длины, содержащего k сообщений первичных источников (каналов), каждое из которых содержит адрес источника и информационную часть.



Рис. 4.30. Диаграмма нерегулярного цикла опроса



Рис. 4.31. Схема объединения входов коммутатора

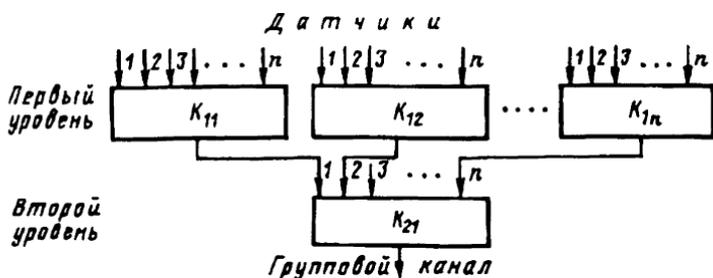


Рис. 4.32. Схема многоступенчатого группирования

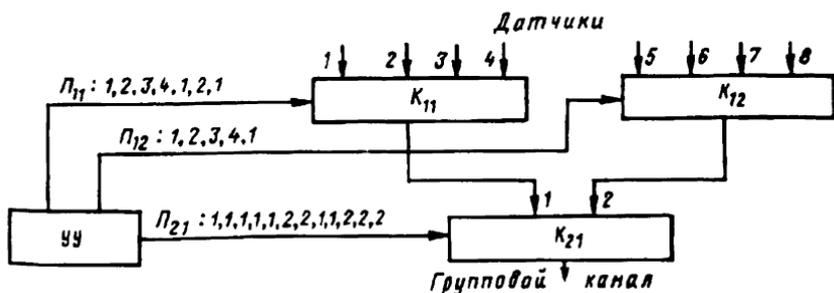


Рис. 4.33. Схема программируемого коммутатора

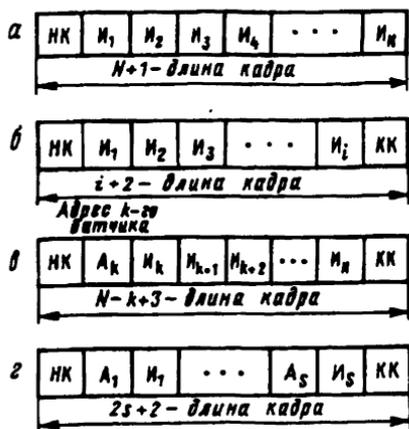


Рис. 4.34. Структура группового кадра данных:
 а - позиционный кадр; б, в - усеченные позиционные кадры; г - адресный кадр

Схема выделения маркера определяет начало кадра и запускает схему выделения сообщения канала, которая формирует сигналы селекции адреса t_a и информационной части t_m . Адрес подается в регистр адреса, управляющий дешифратором, который производит подключение соответствующего приемника сообщений каналов к входной цепи группового канала. По сигналу t_m эта цепь открывается, и информационная часть поступает в приемник. Временная диаграмма иллюстрирует взаимное расположение управляющих распределительных сигналов. Для селекции маркера и других синхропризнаков используются особые виды модуляции, символы и их комбинации.

В случае безадресного циклического кодирования схема распределителя существенно упрощается. Так, например, положение информационной части и адрес могут быть

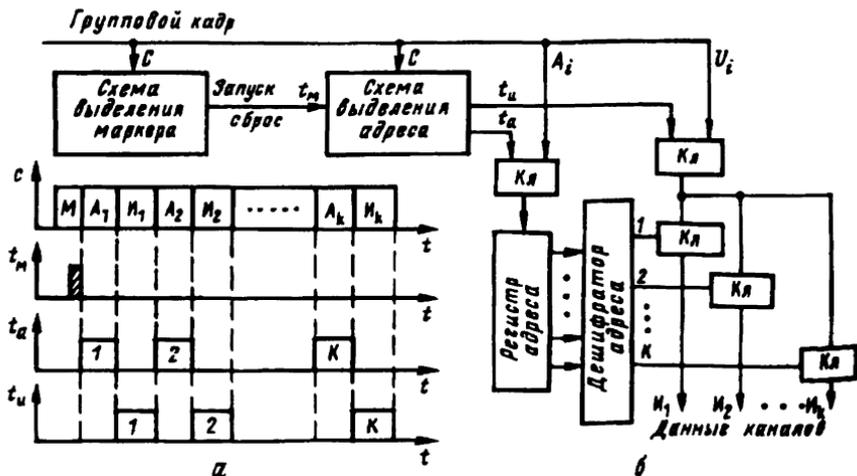


Рис. 4.35. Схема дешифрации кадра:
 а - диаграмма распределения; б - структура распределителя

получены путем простого счета синхропризнаков, символов, слов и т.п., отсчитываемых с момента начала группового кадра.

Несмотря на определенные сложности адресного опроса и использования гибких программ выбора датчиков, их применение в условиях использования микропроцессорной техники для многоцелевых испытательных систем является предпочтительным.

Наилучшие возможности для их внедрения открывают многоцелевые и многодиапазонные элементы ССД с программируемой структурой.

Еще одно из важных направлений обеспечения эффективного использования оборудования ССД и уменьшения информационных потоков связано с максимально возможным приближением процессов обработки данных к источникам их формирования. Такая обработка может включать измерительные процедуры, отдельные процедуры предварительной и полной обработки ЭД, операции установления опасных градиентов изменения состояний объектов, превышения допусков или опасного к ним приближения.

Реализация этих возможностей не только снижает объем избыточной информации по сравнению с обычными методами сбора, но и позволяет реализовать сбор данных по запросам объектов испытаний и управления, а также промежуточных элементов ССД. Немаловажное значение, особенно при использовании цифровой техники, имеет введение буферных накопителей (памяти), обеспечивающих рациональное использование быстродействующих функциональных элементов, например ЭВМ, микропроцессоров, каналов передачи данных.

Наибольшие возможности совершенствования ССД открывает использование датчиков с цифровыми выходами.

Сбор данных и подготовка их к вводу в ЭВМ могут осуществляться не только в реальном масштабе времени автоматическими системами, но и с предварительным накоплением их на машиночитаемых носителях. При этом используются различные носители информации и технические средства регистрации, накопления и хранения данных.

Носитель информации представляет собой перемещающееся в пространстве физическое средство (материальный объект), способное воспринимать информацию, хранить ее в течение длительного времени и позволяющее считывать данные визуально или с помощью технических средств.

По способу записи различают перфорационные, магнитные, оптические или текстовые (графические) носители.

Перфорирование заключается в механическом изготовлении отверстий (соответствующих символам двоичных кодов) в носителях, изготовленных из бумаги, картона, тонкой пластмассы, металлизированных лент и других материалов.

Носители с магнитной записью представляют собой гибкий или твердый материал с нанесенным на него тонким магнитным слоем.

При оптической записи используются светочувствительные материалы (пленки), на которые наносятся светопроницаемые или светонепроницаемые метки, знаки, символы, изображения.

Графическая и текстовая запись заключается в нанесении визуально читаемых линий, символов, цифр, букв механическим, магнитным или оптическим способом на бумажные, пластмассовые и другого вида ленты, форматы. Перфокарты являются одним из первых машиночитаемых носителей данных. Они используются для записи кодовых комбинаций и различаются числом столбцов записи кодов и характером перфорации. Наибольшее распространение получили 80-колонковые перфокарты Холлерита.

Рабочая площадь карты разбита на зоны — служебные и информационные. На карты Холлерита, имеющие 12 строк, может быть нанесено 960 отверстий. Перфокарты допускают многократное считывание данных, в том числе и визуально.

Перфоленты применяются для записи кодированных данных и изготавливаются на бумажной или тонкопленочной основе толщиной 0,085 — 0,1 мм. Запись осуществляется в виде слова длиной 5 — 8 двоичных разрядов, расположенного поперек ленты. Каждый разряд слов записывается на отдельных дорожках.

Помимо информационных на ленту наносится синхронизирующая или транспортная дорожка, используемая для перемещения ленты. Наибольшее распространение получили 5- и 8-дорожечные линии.

Ленты выпускаются бобинами. Они позволяют записать примерно $10 - 12 \cdot 10^4$ двоичных знаков.

Для записи данных используются международный 5-разрядный телеграфный код, 7-разрядный код с дополнительным разрядом кодирования на четность и другие коды.

Достоинством перфолент является их сравнительная дешевизна и простота. Однако они имеют сравнительно низкие скорости записи, в электромеханических устройствах — примерно 150 строк в 1 с.

Магнитные ленты представляют собой тонкопленочную основу, на одну из сторон которой нанесен один слой или несколько слоев ферромагнитного материала. Начало и конец ленты маркированы светоотражающими метками, воспринимаемыми оптическими устройствами управления передвижением лент. Двоичным знакам соответствуют различные направления (знаки) намагничивания.

Существует целый ряд стандартизованных способов записи, размещения, считывания и управления движением лент.

Для сбора цифровых данных чаще всего используют ленты шириной 12,7 и 3,81 мм. Длина ленты шириной 12,7 мм достигает 740 м.

Запись данных ведется на девяти информационных и одной контрольной дорожке. Площадь ленты разделена на служебные зоны, промежутки, снабженные признаками начала и конца ленты, и рабочую зону, содержащую информационные блоки емкостью до 2048 8-разрядных слов (байт). В зависимости от способа записи достигается плотность записи порядка 50 — 63 бит/мм и скорость записи 126 Кбайт/с.

На одной ленте может быть достигнут объем памяти 20 Мбайт. Максимальный объем памяти ленты шириной 3,81 мм составляет 236 Кбайт на дорожку, скорость записи-считывания достигает 6 Кбит/с.

Гибкие магнитные диски представляют собой тонкую полистироловую пленку круглой формы толщиной примерно 80 мкм, покрытую с обеих сторон ферромагнитным слоем. Коды записываются на кольцевые концентрические дорожки на обеих сторонах диска.

Диск помещают в квадратные кожухах с гладким скользящим внутренним покрытием, снабженных отверстиями для установки в устройствах считывания-записи, а также для магнитных головок.

При частоте вращения, равной 6 с^{-1} для большого и 5 с^{-1} для малого дисков, скорость записи-считывания различными способами модуляции (FM или MFM) достигает соответственно 250 — 500 Кбит/с в большом диске и 125 — 250 Кбит/с в малом.

Объем памяти при односторонней записи составляет 400 — 800 Кбайт для большого диска и 125 — 250 Кбайт для малого диска.

Магнитные диски характеризуются более высокими скоростями записи-считывания, удобством обращения и перезаписи, низкой стоимостью.

Гибкие диски и магнитные ленты могут использоваться также в качестве внешних запоминающих устройств ЭВМ. Характеристики магнитных носителей информации, используемых в системе СМ ЭВМ, приведены в табл. 4.12.

Т а б л и ц а 4.12

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИИ

Параметр	Тип ЗУ					
	НМЛ	НКМЛ	НМД	НМД (кас-сетный)	НГМД	НМГМД
Диаметр, мм	—	—	130	—	203	133
Емкость памяти, Мбайт	11 — 46	0,5 — 0,72	20 — 80	2,4 — 9,6	0,12 — 66	0,3 — 1,6
Время доступа, мс	—	—	16 — 170	25 — 85	—	—
Скорость обмена информацией, Мбайт/с	0,05	0,005	0,5 — 1,2	0,6 — 1,2	0,031	0,031

Здесь НМЛ, НКМЛ, НМД, НГМД означают накопители на магнитных лентах, кассетных магнитных лентах, магнитных дисках и гибких магнитных дисках соответственно.

Для записи дискретной информации используется стандартная аппаратура вычислительных комплексов, а также специальное стационарное, переносное оборудование записи-воспроизведения. Магнитные носители используются также для записи информации в аналоговой форме. Существует два метода записи — прямой, без всякого преобразования, и модулированная запись с использованием непрерывных и импульсных несущих. При прямой записи каждый сигнал записывается на отдельную дорожку носителя. Никаких ограничений на вид сигнала при этом не накладывается. Полоса записываемых частот от 30 — 40 Гц до 150 — 200 кГц и выше.

Применение записи с модуляцией обеспечивает большую точность записи, возможность регистрации постоянных составляющих, низкочастотных сигналов и сигналов с широкой полосой частот, достигающей значений 2 МГц при скорости протяжки ленты 150 — 200 см/с. Для записи-воспроизведения аналоговой информации используется различная специализированная и универсальная аппаратура. Наибольшее распространение получили многоканальные магнитофоны с магнитной лентой шириной 6,25, 12,7 и 25,4 мм. При частотном уплотнении допускается запись на одну дорожку нескольких (порядка 20) сигналов. Важной характеристикой магнитофонов для записи аналоговых данных является стабильность скорости протяжки ленты.

Комбинированные методы записи обеспечивают возможность одновременной записи на один и тот же носитель цифровых и аналоговых сигналов. При этом записываются как низкочастотные, так и высокочастотные сигналы.

4.5.3.

Обработка экспериментальных данных

Обработка информации осуществляется в несколько этапов, каждому из которых соответствует определенный набор методов, средств и операций преобразования, регистрации, вычисления, отображения, анализа и оценки данных.

Первый этап связан с переработкой и оценкой экспериментальных данных непосредственно в процессе испытаний и сбора первичных данных. Цель его — обеспечение взаимодействия технических средств, защита информации от искажений, введение информационных признаков последующей идентификации места и времени форми-

рования данных, вида физических величин, форм записи, формирования носителей данных, а также проведение их экспресс-анализа.

К числу процедур, выполняемых на этом этапе, относятся различные виды аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований, кодирования-декодирования, записи информации на человеко- и машиночитаемых носителях и др.

Экспресс-анализ заключается в выборочном контроле первичных экспериментальных данных. Он осуществляется путем визуального просмотра сигналов, распечатки и графического представления информации, выполнения расчетов характеристик данных, испытательных и информационно-процессов.

Целью экспресс-анализа является контроль качества экспериментальных данных и процесса испытаний, настройка аппаратуры и коррекция программы испытаний или сбора данных. Экспресс-анализ выполняется, как правило, в реальном масштабе времени, поэтому он основывается на небольших объемах информации и требует применения быстродействующих средств и удобства общения человека с машиной.

Экспресс-анализ может выполняться на любом из этапов сбора данных. Для оперативной обработки применяются многоканальные осциллографы, осциллографические самописцы, графопостроители, видеосредства дисплеев и терминалов, печатающие устройства и ЭВМ.

Первичные экспериментальные данные и результаты экспресс-анализа поступают для дальнейшей обработки автоматически либо в виде магнитных лент, дисков, перфокарт, осциллограмм, кинолент и других носителей. Данные могут быть представлены в дискретной или аналоговой форме.

Второй этап обработки связан с подготовкой данных для ввода в ЭВМ и их первичной обработкой. Необходимость такой подготовки данных обусловлена имеющимся в ряде случаев различием типов и структуры сигналов носителей, форматов и алфавитов данных, быстродействия и других характеристик ЭВМ и носителей первичных экспериментальных данных.

Подготовка данных включает: воспроизведение дискретной и аналоговой информации с магнитных носителей, преобразование аналоговых сигналов в дискретные; считывание и преобразование в цифровую форму графических записей на бумажных носителях и осциллограммах, координат точек фото- и киноизображения; перезапись данных с одних носителей на другие, уплотнение и объединение их в машинные слова и стандартные машинные зоны, блоки и массивы; буферизацию данных, поступающих по каналам передачи данных, запись данных во внешние запоминающие устройства ЭВМ (накопители на магнитных лентах, дисках, барабанах и т.п.); выборочный контроль подготавливаемых данных.

Первичная обработка заключается в обнаружении и устранении искажений полезных сигналов, отбраковке дефектной информации, выборе участков записей для дальнейшей обработки, привязке параметров сигналов к параметрам физических объектов и процессов, учете индивидуальных свойств датчиков и других технических средств.

На данном этапе значительная роль принадлежит испытателю. Визуальный просмотр данных, их анализ, выбор программ обработки, калибровки, линеаризации, отображения и регистрации данных в процессе первичной обработки выполняется экспериментатором. Часть операции выполняется автоматически. К очистке сигналов относятся: обнаружение и устранение ложных выбросов — локальных величин или участков данных, существенно отличающихся от остальных величин числовой последовательности; фильтрация сигналов помех; устранение нестабильности телеметрического нуля, линейных и нелинейных трендов, обусловленных нестабильностью характеристик датчиков, аппаратуры передачи и записи данных; приведение координат процесса к физическим величинам (масштабирование, функциональное преобразование, выбор единиц измерения и т.п.) и линеаризация характеристик датчиков на основе их калибровочных зависимостей; определение стационарности, нормальности и построение законов распределения случайных величин в интересах оценки процессов и полноты данных; уточнение частотных спектров сигналов и другие операции. Для выполнения предварительной обработки используется универсальное и специальное оборудование — средства отображения (осциллографы, графопостроители, дисплеи), устройства фильтрации и сглаживания сигналов, корреляторы, спектроанализаторы, формователи машинных слов, обеспечивающие запись данных с носителей и паспортных данных считываемой информации, ее сортировку, выборку соответственно паспортным данным, источникам, каналам, временным интервалам, упаковку в машинные слова, блоки, массивы и запись данных во внешние накопители ЭВМ. При выполнении перечисленных операций используются встроенные или самостоятельные микропроцессоры и ЭВМ.

На рис. 4.36 представлена схема процесса подготовки и первичной обработки данных, на которой указаны основные средства записи, отображения, регистрации и обработки. Выделена ЭВМ (СЭВМ) для выполнения специализированных преобразований и расчетов.

Третий этап обработки связан с организацией вычислительного процесса по выполнению полной обработки экспериментальных данных, реализации формализуемых процедур формирования и оценки результатов и хода процесса испытаний, подготовки рекомендаций и решений по использованию результатов и управлению экспериментом. В большинстве испытательных систем полная обработка заключается в вычислении статистических характеристик случайных процессов,

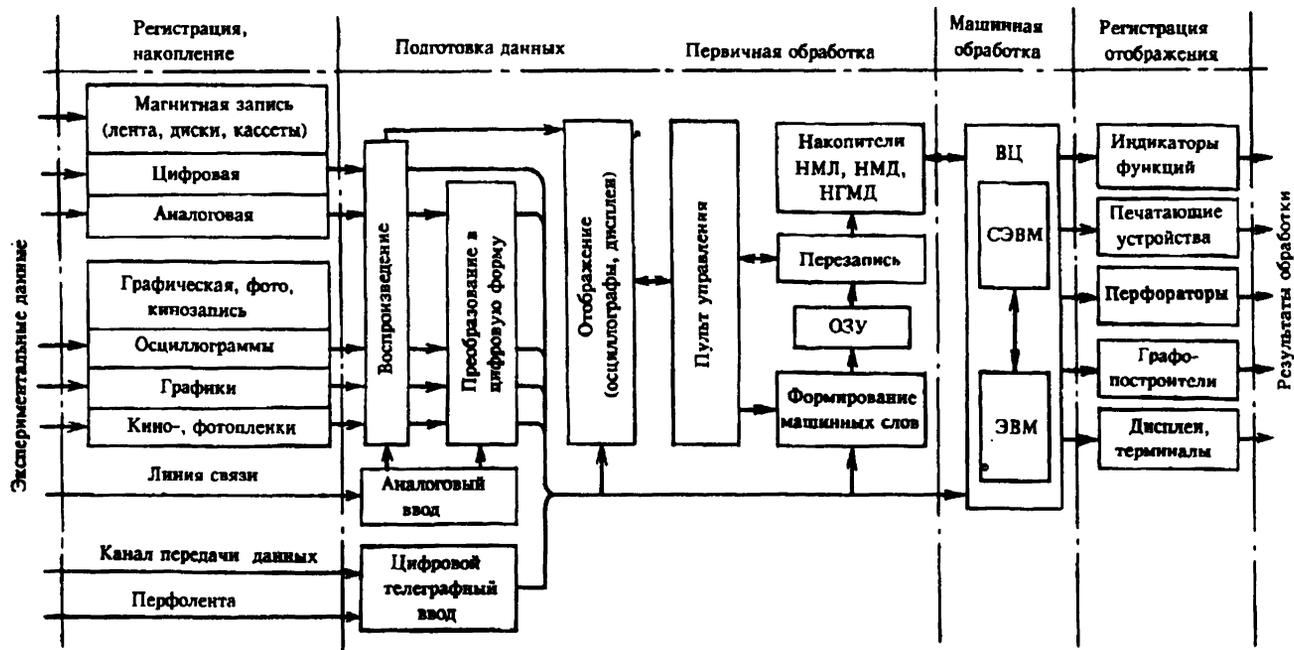


Рис. 4.36. Схема подготовки и первичной обработки экспериментальных данных

определении логико-функциональных зависимостей параметров объектов испытаний. Обработка может осуществляться в реальном времени и с предварительным накоплением исходных данных в памяти ЭВМ. В режиме реального времени выполняется: построение дифференциальных и интегральных законов распределения случайных величин; вычисление оценок математического ожидания, дисперсии, коэффициентов асимметрии и эксцесса; определение доверительных интервалов и т.п.

При обработке с предварительным накоплением исходных данных производится также определение оценок спектральной плотности, корреляционных функций, взаимно спектральных и взаимно корреляционных характеристик и функций когерентности и т.п.

При полной обработке помимо статистических характеристик случайных процессов определяются функциональные и эксплуатационные параметры объектов испытаний, оценивается их техническое совершенство и соответствие предъявленным требованиям, адекватность моделей, гипотез реальному поведению объектов и ходу процессов в условиях эксперимента.

Особую группу задач машинной обработки составляет выполнение программ управления и контроля состояния средств испытаний, сбора и обработки экспериментальных данных.

Машинная обработка экспериментальных данных осуществляется в рамках вычислительных комплексов и систем, состав и структура которых определяются типом системы испытаний, задачами испытаний, объемом данных, методами обработки и способами организации вычислительного процесса.

В зависимости от числа ЭВМ различают одномашинные системы обработки данных и вычислительные комплексы (несколько ЭВМ). Системы обработки данных, настроенные на решение задач конкретной области, называются вычислительными системами.

Ориентация осуществляется как за счет использования специализированных ЭВМ и вычислительных комплексов, так и за счет программных средств — прикладных программ и, возможно, операционных систем на основе ЭВМ и комплексов общего назначения. В системах испытаний используются оба способа. Специализированные ЭВМ и микропроцессоры находят применение в измерительных системах, системах передачи данных, а также для обработки, ввода, выбора данных, записанных на специализированные носители.

Структуры вычислительных систем весьма разнообразны и соответствуют вышерассмотренным структурам измерительных систем, систем передачи данных и сбора экспериментальных данных. Так, например, различают сосредоточенные системы, локальные и глобальные вычислительные сети, системы телеобработки.

Различают прикладные задачи системного управления. К прикладным задачам относятся сбор данных, корректировка массивов инфор-

мации, обработка данных и выдача их пользователям, предоставление справок и обеспечение диалога пользователя с системой, передача данных между пользователями, управление технологическими процессами и техническими системами и др.

К задачам управления относятся обеспечение взаимодействия прикладных функциональных задач, установление очередности их выполнения, распределение ресурсов между прикладными задачами и т.п.

Каждой задаче соответствует ряд функций. К управляющим функциям относятся функции организации управления вычислительным процессом. Эти функции обычно выполняются программами операционной системы (ОС) и ее расширениями. Их трудоемкость определяется характером функций и не зависит от объема вводимых и выводимых сообщений.

К числу основных функций управления относятся:

— инициации, обеспечивающие подготовку системы к функционированию и выполняемые при ее первоначальном пуске;

— диспетчеризация и синхронизация, обеспечивающие согласованное со случайными событиями внешней среды выполнение прикладных задач, а также распределение ресурса центрального процессора между одновременно выполняемыми прикладными задачами;

— обмен данными между прикладными задачами, позволяющий после выполнения некоторых прикладных функций инициировать другие функции и передавать им необходимые данные. Обмен и диспетчеризация реализуются программами ОС, а также организацией специальных управляющих обменников, накапливающих запросы на выполнение прикладных задач, удовлетворяющих ОС согласно порядку поступления запросов и их приоритетов;

— обработка прерываний, предназначенных для обслуживания прерываний прикладных задач по запросам от внешних устройств для ввода-вывода данных. Запрос на прерывание передается ОС определенной прикладной задаче, выполняющей функцию ввода или вывода;

— управление распределением свободной памяти, осуществляющей динамическое перераспределение свободных участков памяти между прикладными задачами.

Прикладные функции системы соответствуют технологическим этапам процессов преобразования входной информации функциональной задачи в выходную. Они подразделяются на функции ввода данных, вывода данных, записи, хранения и изменения массивов данных, поиска данных в массивах, приема-передачи данных по каналам связи.

Завершающий этап обработки осуществляется на основе полученных экспериментальных данных, материалов теоретических расчетов и специальных лабораторных или стендовых исследований и испытаний,

результатов машинного эксперимента и моделирования, а также ранее выполненных работ. Состав и виды используемой информации и материалов определяются конкретными условиями анализа. Результатом оценки проведенной работы может быть решение о достаточности экспериментальных данных, о прекращении, продолжении или повторении отдельных этапов испытания.

Выполнение задач и функций вычислительного процесса обеспечивается комплексом технических средств, включающим ЭВМ, внешние устройства, устройства сопряжения с объектом и средства передачи данных.

В настоящее время имеется множество комплексов и унифицированных отдельных элементов вычислительных систем, позволяющих создавать практически любые структуры.

Обобщенные данные некоторых видов микро-ЭВМ приведены в табл. 4.13.

Т а б л и ц а 4.13

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРО-ЭВМ

Параметр	Тип микро-ЭВМ			
	СМ 1841	СМ 1810	СМ 1804	СМ 180
Разрядность центрального процессора, бит	16	16	16	16
Набор команд центрального процессора	МЦП - 16 МЦП-1	МЦП - 16 МЦП-1	МЦП-1	МЦП-1
Время выполнения команд, мкс	0,4 - 37,8	0,4 - 37,8	2 - 8,5	2 - 8,5
Емкость ОП, Кбайт	2000	16000	1000	128
Быстродействие программного канала ввода-вывода, Кбайт/с	150	150	40	40
Быстродействие канала прямого доступа, Кбайт	500	500	250	250
Число уровней прерывания	9	9	9	9
Количество адресуемых портов:				
ввода	65536	65536	256	256
вывода	65536	65536	256	256

Параметр	Тип микро-ЭВМ			
	СМ 1841	СМ 1810	СМ 1804	СМ 180
Системный интерфейс	И41	И41	И41	И41
Потребляемая мощность, Вт	250	800	2000	2000
Штатная операционная система	БОС 1810	ДОС 1810	ДОС 1800	СПД

Основой вычислительной системы на базе микро-ЭВМ может служить, например, комплект 16-разрядной микро-ЭВМ семейства М 16-1, обеспечивающий широкие возможности для создания системы обработки данных и управления ходом испытаний на принципах структур с локальными и распределенными сетями. В качестве центральной и местной ЭВМ системы может использоваться микро-ЭВМ СМ 1810 как типичная модель семейства М 16-1.

Структура комплекта ее оборудования приведена на рис. 4.37. Основные возможности ЭВМ и ее элементов заключаются в следующем.

Элементарной базой ЭВМ является микропроцессорный набор К1810. Диапазон адресации до 1 Мбайт памяти и до 65536 портов для устройств ввода-вывода. Память может быть расширена до 16 Мбайт. Число источников прерывания может достигать 64. Два независимых канала ввода-вывода в контроллерах внешней памяти позволяют осуществить обмен данными с памятью прямого доступа со скоростью 1,25 Мбайт/с.

Используется интерфейс И41 с увеличенной до 24 разрядностью адреса и возможностью монопольного захвата интерфейса.

Подсистема обработки содержит центральный 16-разрядный процессор на модуле МЦП-16 (до 16 модулей), 8-разрядный процессор ввода-вывода МП-1, ОЗУ (256 Кбайт), ППЗУ (164 Кбайт). Последовательный и параллельный арбитраж интерфейса осуществляется контроллером МСК-16. Предусмотрено два варианта системного ОЗУ — МОЗ на 256 Кбайт и на 4 Мбайт с коррекцией ошибок. Перечисленные элементы составляют ядро системы.

К периферийным устройствам относится накопитель на 130-миллиметровом гибком диске (НГМД) трех типов: с односторонней записью СМ 5640 (0,5 Мбайт), с двусторонней записью СМ 5639 (0,5 Мбайт), дисковый накопитель типа «Винчестер» (20 — 160 Мбайт). Имеется возможность подключения накопителей на миниатюрных гибких дисках типа малый «Винчестер» (20 Мбайт).

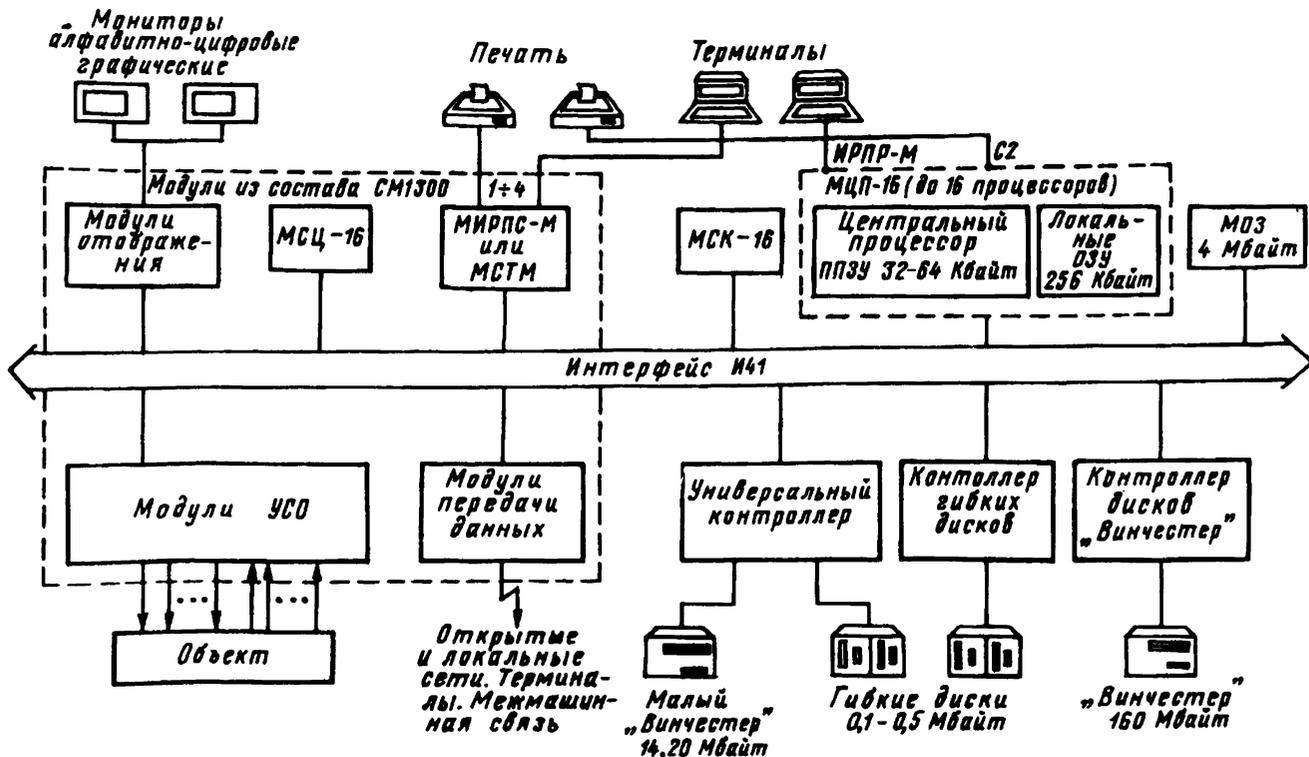


Рис. 4.37. Структура комплекта микро-ЭВМ СМ 1810

В качестве пульта управления используются микропроцессорные дисплеи различных модификаций, отображающие русские и латинские буквы, а также простейшую графику.

Существует также несколько типов печатающих устройств. В частности, матричное устройство печати СМ 6329 позволяет выводить от 80 до 136 знаков в строке (размером 9x9 точек) при скорости печати 100 зн./с.

Связь дисплеев и печатающих устройств с ЭВМ осуществляется через интерфейс ИРПС, ИРПР, ИРПР-М и стык С2 модулей МЦП-16, МСТМ и МИРПС-М.

Для отображения алфавитно-цифровой и графической информации в черно-белом и цветном изображении могут быть использованы мониторы и бытовые телевизоры, подключаемые через модули отображения.

Для организации связи имеются модули связи с модемом по стыку С2, четырехканальный модуль связи с терминалами, модуль связи с телетайпом, микропроцессорный модуль для организации локальной сети промышленного применения, программируемый канальный адаптер для связи со средствами телемеханики, модуль межмашинной связи на расстояние до 30 км.

Особое значение для применения в испытательных комплексах имеет набор модулей и устройств связи с объектом испытаний (УСО). Они позволяют обеспечить:

— ввод сигналов от дискретных датчиков с развязкой цепей управления и датчиков — 16 каналов;

— вывод сигналов двухпозиционного регулирования на исполнительные механизмы с развязкой цепей управления и исполнительных механизмов, частота сигналов до 10 кГц — 8 каналов;

— ввод числоимпульсных сигналов частотой до 20 кГц при емкости счетчиков 8 бит — 2 канала;

— вывод дискретных сигналов повышенной мощности для коммутации исполнительных цепей без усиления, частота до 100 кГц — 4 канала;

— управление цепями переменного тока повышенной мощности (управление механизмами переменного тока, мощными реле, контакторами и т.д.), максимальный ток 3 А — 4 канала;

— ввод аналоговых сигналов постоянного тока от датчиков: диапазон 5 — 0 В, время 100 мкс, разрядность 13. При однопроводной и двухпроводной коммутации соответственно 16 и 8 каналов;

— выдачу аналоговых сигналов постоянного тока 9,5 мА или напряжения — 0 — 10 В путем преобразования 10-разрядных кодов со скоростью до 10 мкс — 2 канала.

В настоящее время в качестве средств обработки данных получают распространение так называемые персональные микро-ЭВМ (ПЭВМ).

Это совокупность микропроцессорных устройств, имеющих архитектуру и выполняющих функции малой вычислительной машины, находящейся в пользовании одного лица или небольшого числа лиц. ПЭВМ, ориентированные на решение специального класса задач, называются профессиональными ПЭВМ. В системах сбора и обработки данных ПЭВМ может рассматриваться как интеллектуальный терминал. Однако она имеет достаточно мощные вычислительные и информационные ресурсы, которые могут использоваться самостоятельно или совместно с другими ЭВМ. ПЭВМ оснащаются средствами для выхода через специальные сетевые станции в информационные сети. Развитое программное обеспечение позволяет использовать алгоритмические языки высокого уровня. Характеристики некоторых ПЭВМ приведены в табл. 4.14.

Т а б л и ц а 4.14

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЭВМ

Основные характеристики	Марка ПЭВМ				
	БК-001	ДВК-3	ЕСПВМ	С1810	Искра-250
Разрядность процессора	16	16	16	16	16
Емкость ОЗУ, Кбайт	56	256	256 - 640	256 - 1000	256 - 640
Накопители (ОС)	—	НМД, НМГД	НМД	НМД	НМД
Алфавитно-цифровой дисплей СИМ/СССР	60/16	80/24	80/25	80/25	80/25
Тип операционной системы	—	РАФОС	РСДОС	ИНМОС	—

4.6. Автоматизация управления испытаниями

Получение экспериментальных данных о свойствах испытуемых объектов и процессоров требует организованного и согласованного во времени и пространстве взаимодействия всех элементов и подсистем испытательных средств, объекта, аппаратуры сбора и обработки экспериментальных данных.

Такое организованное взаимодействие обеспечивается в процессе управления испытаниями.

Основными функциями управления являются планирование, организация, контроль и оперативное управление.

Функция планирования определяет цели, содержание, последовательность управленческих действий и процедур, необходимые для их реализации ресурсы (информационные, временные, материальные и т.п.) и исполнителей (персонал), технические средства, программное, математическое и другие виды обеспечения. Результатом планирования является план, программа, закон управления, отражающие в терминах режимов, программ, алгоритмов работы, значений параметров и состояний технических средств, видов решений и управляющих воздействий совместно с правилами их принятия и реализации и т.п. программу (процесс) испытаний.

Функция организации предусматривает создание информационной структуры системы управления, отражающей состав, назначение, права и ответственность элементов (операторов, технических средств и т.п.) системы, порядок их взаимодействия, состав, формы и виды представляемой информации и вырабатываемых решений. Организация порождает обычно определенную иерархию (подчинение) уровней, органов и средств управления, обусловленную распределенностью объекта управления, принятым распределением полномочий и ответственности.

Функция контроля заключается в определении и оценке текущего состояния объекта управления с целью принятия решений. Контроль предусматривает сбор данных о параметрах и состояниях объекта управления и оценку соответствия их заранее установленной норме (допускам, правилам, алгоритмам функционирования и т.п.). Контроль может предусматривать необходимость машинного моделирования и формирования специальных воздействий с целью идентификации состояний. Частным случаем контроля является диагностика, заключающаяся в определении вида, места возникновения и причин отклонения текущего состояния от требуемого.

Оперативное управление, или просто управление, состоит в принятии и реализации решений по выбору рациональных способов устранения отклонений процесса испытаний от нормы. В функцию оперативного управления могут входить оценка и прогнозирование развития возникшей ситуации и последствий принятых решений, а также изменение (коррекция) программы испытаний.

Характер, содержание, цели и степень формализуемости управленческих функций и отдельных процедур весьма разнообразны. Это зависит как от сложности системы испытаний, так и от уровня иерархии управления.

В качестве объектов управления могут выступать средства испытаний, объект испытаний и средства сбора и обработки данных. В рамках автоматизированной (автоматической) системы управления эти подсистемы управления могут быть самостоятельными, децентрализованными. Их взаимодействие может быть реализовано в этом случае, например, на уровне руководителя испытаниями, единой программы испытания. Возможен вариант объединения самостоятельных подсистем на верхнем уровне единой централизованной автоматизированной системы управления.

Наиболее часто в современных системах используется принцип информационного взаимодействия между системами управления объектом и средствами испытаний, с одной стороны, и системы сбора и обработки экспериментальных данных — с другой. При этом учитывается, что не все алгоритмы управления и контроля объектом и средствами испытания достаточно отработаны и нормированы и что информативность ССО ЭД потенциально выше. Поэтому между ними организуется дополнительный поток данных, значение которого тем выше, чем большей неопределенностью характеризуется текущая ситуация управления.

Организация, состав и структура системы управления средствами испытаний и объектами испытаний зависят от ряда факторов, основными из которых являются:

- состав, объем и виды воздействий, необходимых для управления объектом (объектом и средствами испытаний);
- протяженность объекта управления;
- удаление объекта от средств обработки и управления;
- состав, объем и виды первичной информации о состоянии объекта;
- степень автоматизации и механизации объекта;
- активность, быстродействие и другие характеристики объекта.

От характеристик воздействий зависят число каналов, их быстродействие, энергетические характеристики, виды сигналов, воздействий, диапазоны их изменений и т.п.

Современные системы управления на основе унифицированных управляющих и измерительных вычислительных комплексов предполагают выдачу цифровых сигналов, которые могут быть восприняты цифровыми автоматами и микропроцессорными устройствами; дискретных двухпозиционных сигналов, которые могут быть использованы для управления исполнительными элементами релейного типа (контакторами, переключателями, электромагнитными и электронными реле и т.п.), и аналоговых сигналов для управления исполнительными элементами непрерывного действия (двигателями, регуляторами, генераторами и т.п.). Для согласования мощности, уровней форм и видов сигналов (отличающихся от унифицированных) могут использоваться согласующие устройства (усилители, преобразователи).

Протяженность и удаление объекта от средств обработки и управления определяют структуру и тип системы управления (местная, локальная, рассредоточенная, дистанционного управления и телеуправления), как и в системах сбора первичных экспериментальных данных.

Состав, объем и виды первичной информации о состоянии объекта управления определяют состав подсистемы сбора данных. В современных системах информация с объекта поступает в виде цифровых, дискретных, аналоговых сигналов, импульсных последовательностей либо приводится к такому виду посредством промежуточных преобразований.

Степень автоматизации и механизации объекта определяет степень участия персонала в управлении техническими средствами, формы взаимодействия системы управления с объектом, состав ее оборудования и реализуемых функций.

Степень активности объекта зависит от уровня перераспределения функций контроля между объектом (встроенными средствами контроля) и аппаратурой системы управления. При отсутствии такого распределения (пассивный объект) опрос датчиков и определение состояний объекта осуществляются с периодичностью, установленной заранее или устанавливаемой системой управления по ходу испытаний. Активный объект формирует самостоятельно запросы на обслуживание — уточнение своего состояния и приведение его в норму. Запросы формируются в виде специальных инициативных сигналов или сообщений.

В испытательных комплексах важная роль принадлежит регулированию, которое заключается в поддержании заданного или программно изменяемого уровня параметров испытательных систем и объектов управления.

Регулирование осуществляется путем определения состояния объекта или действующих на него возмущений и воздействия на регулирующий орган объекта.

Системы и автоматы регулирования относятся к нижним ступеням интегрированной системы управления испытательных комплексов.

Типовая структура системы регулирования (рис. 4.38) включает в себя следующие основные элементы: объект регулирования, задающее устройство, регулятор, сравнивающее устройство, усилитель и измерительное устройство.

На объект управления действует возмущение внешней среды $\xi(t)$ и управляющее воздействие регулятора $r(t)$, обеспечивающее поддержание (регулирование) требуемого значения выходного параметра $y(t)$. Требуемое значение $x(t)$ регулируемого параметра $y(t)$ определяется программой-установкой (Уст), формируется задающим устройством в виде аналоговой или цифровой величины и может изменяться в ходе регулирования. Текущее значение $y(t)$ в виде сигнала обратной

связи (ОС) воспринимается чувствительным элементом (ЧЭ) измерительного устройства, измеряется, преобразуется в преобразователе (ПР) и подается на вход сравнивающего устройства.

Сравнивающее устройство определяет величину рассогласования $\varepsilon(t) = x(t) - y(t)$ и формирует сигнал ошибки регулирования. Устройство усиления в преобразователе (ПР) и усилителе (У) преобразует сигнал ошибки в форму, пригодную для восприятия регулятором.

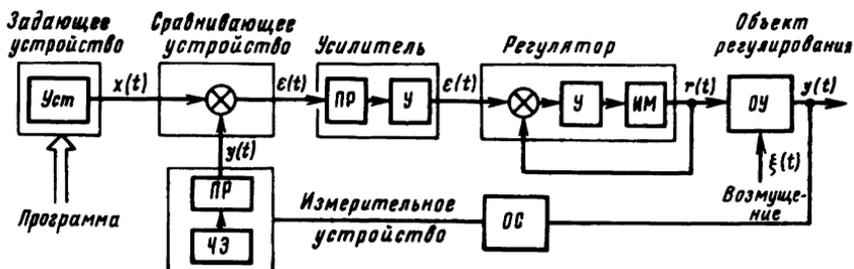


Рис. 4.38. Структура системы регулирования

Регулятор через исполнительный механизм (ИМ) выдает управляющее воздействие на объект регулирования. Улучшение качества регулирования обеспечивают корректирующая обратная связь, сравнивающее устройство и усилитель.

Представленная система реализует управление «по отклонению» и является замкнутой системой регулирования. Существуют разомкнутые системы, без обратной связи, реализующие принцип регулирования «по возмущению» на основании измерения возмущений.

В зависимости от вида используемой энергии различают механические, гидравлические, электрические и пневматические системы регулирования.

На рис. 4.39 представлена обобщенная двухуровневая структура управления испытательным стендом. Местное управление, реализуемое вручную и автоматически, через блок местной автоматики и регулирования (МАР) и пульт управления, обеспечивает включение, проверку и настройку стенда. Для проведения испытаний, сбора и обработки данных используется унифицированный управляющий вычислительный комплекс. Устройство сопряжения с объектом включает штатные средства ввода-вывода сигналов и специальные преобразователи управляющих воздействий и сигналов датчиков.

Дальнейшее усовершенствование технических средств управления, сбора и обработки экспериментальных данных связано с применением цифровой и микропроцессорной техники, модульно-агрегатированных принципов конструирования аппаратуры.

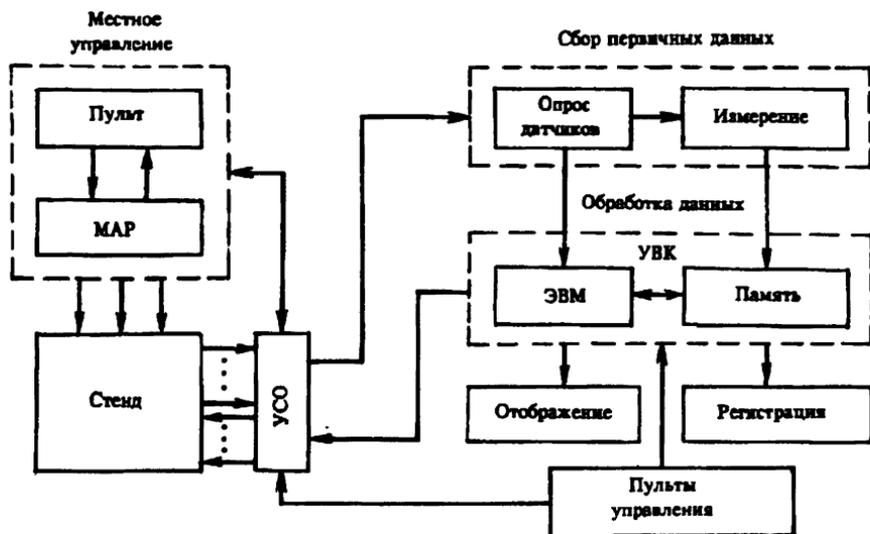


Рис. 4.39. Схема управления испытательным стендом

Успехи в микроминиатюризации вычислительной техники и снижение ее стоимости позволяют использовать современные микропроцессоры в качестве средств управления и обработки информации практически для всех основных функций испытательных систем.

Литература

1. Алексюк М.М., Борисенко В.А., Кращенко В.П. Механические испытания материалов при высоких температурах. — Киев: Наукова думка, 1980.

2. Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н. Тепловые испытания космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1982.

3. Баженов В.И., Осин М.И., Захаров Ю.В. Моделирование основных характеристик и процессов функционирования космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1985.

4. Бакластов А.М., Горбенко В.А., Удыма П.Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок. — М.: Энергоиздат, 1981.

5. Статические испытания на прочность сверхзвуковых самолетов / Баранов А.Н., Белозеров Л.Г., Ильин Ю.С., Кутьиков В.Ф. — М.: Машиностроение, 1974.

6. Инженерные методы исследования ударных процессов / Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. — М.: Машиностроение, 1977.

7. Бегларян В.Х. Механические испытания приборов и аппаратов. — М.: Машиностроение, 1980.

8. Лабораторный практикум по аэрогазодинамике / Белова А.В., Буравцев А.И., Ковалев М.А., Матвеев С.К. — Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980.

9. Бураковский Т., Гизинский Е., Саля А. Инфракрасные излучатели. — Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1978.

10. Космодром / Вольский А.П., Карин В.М., Николаев В.Н. и др. — М.: Воениздат, 1977.

11. Гальчук В.Я., Соловьев А.П. Техника научного эксперимента. — Л.: Судостроение, 1982.

12. Гжиров Р.И. Краткий справочник конструктора. — М.: Машиностроение, 1984.

13. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

14. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / *Глудкин О.Н., Енгальцев А.Н., Коробов А.И., Трегубов Ю.В.*; Под ред. *А.И. Коробова*. — М.: Радио и связь, 1987.

15. *Горлин С.М., Слезингер И.И.* Аэромеханические измерения, методы и приборы. — М.: Наука, 1964.

16. Борьба с шумом стационарных энергетических машин / *Григорьян Ф.Е., Михайлов Е.И., Ханин Г.А., Щевьев Ю.П.* — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983.

17. Надежность и испытание электровакуумных приборов / *Гуртовник А.Г., Роксман М.А., Гельштейн М.И., Берлянт Г.Л.* — М.: Радио и связь, 1986.

✓18. *Гэтланд К.* Космическая техника. — М.: Мир, 1986.

19. *Ерохин В.Г., Маханько М.Г., Самойленко П.И.* Основы термодинамики и теплотехники. — М.: Машиностроение, 1980.

20. *Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А.* Электродуговые нагреватели газа. — М.: Наука, 1973.

✓21. Испытания жидкостных ракетных двигателей / *Жуковский А.Е., Кондрусев В.С., Левин В.Я., Окорочков В.В.* — М.: Машиностроение, 1981.

22. *Захаров О.Г.* Испытания энерготехнических изделий. — М.: Высш. шк., 1987.

23. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / *Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н.* — М.: Машиностроение, 1974.

24. *Иванов Е.Л., Степанов И.М., Хомяков К.С.* Периферийные устройства ЭВМ и систем. — М.: Высш. шк., 1987.

25. *Ильин В.А.* Телеуправление и телеизмерение. — М.: Энергоиздат, 1982.

26. *Иоффе В.К., Корольков В.Г., Сапожков М.А.* Справочник по акустике. — М.: Связь, 1979.

27. *Капица П.Л.* Эксперимент. Теория. Практика. — М.: Наука, 1981.

28. *Клиланд Д., Кинг В.* Системный анализ и целевое управление. — М.: Сов. радио, 1974.

29. *Клюев В.В.* Испытательная техника: Справочник. — М.: Машиностроение, 1982. — Кн. 1 и 2.

30. *Клюев В.В.* Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. — М.: Машиностроение, 1978. — Кн. 1 и 2.

31. *Копцев Р.Э.* Измерительно-вычислительные комплексы. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.

32. *Королев С.П.* (проф. *Сергеев К.*). Проблема овладения космическим пространством // Правда. 1961. 14 октября.

33. Кошевой А.А. Телеметрические комплексы летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1975.
34. Краус М., Кучбах Э., Вошни О.-Г. Сбор данных в управляющих вычислительных системах. — М.: Мир, 1987.
35. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
36. Куликовский Л.Ф., Мотов В.В. Теоретические основы информационных процессов. — М.: Высш. шк., 1987.
37. Лавренчик В.Г. Постановка физического эксперимента и статическая обработка его результатов. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
38. Ларионов А.М., Майоров С.А., Новиков Т.И. Вычислительные комплексы системы и сети. — Л.: Энергоатомиздат, 1987.
39. Ленк А., Ренитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов. — М.: Мир, 1978.
40. Микишев Г.Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1978.
41. Микропроцессоры / Под ред. Л.Н. Преснухина. — Минск: Высш. шк., 1987.
42. Методы исследований на летающих моделях / Миронов А.Д., Владычин Г.П., Кондратов А.А. и др. — М.: Машиностроение, 1988.
43. Мирский Г.Я. Микропроцессоры в измерительных приборах. — М.: Радио и связь, 1984.
44. Мирский Г.Я. Электронные измерения. — М.: Радио и связь, 1986.
45. Мишин В.П. Земные программы космонавтики // Коммунист. 1983. № 6.
46. Основы проектирования летательных аппаратов: (Транспортные системы) / Мишин В.П., Безвербый В.К., Панкратов Б.М., Щевров Д.Н. — М.: Машиностроение, 1985.
47. Морозов В.К., Долганов А.В. Основы теории информационных сетей. — М.: Высш. шк., 1987.
48. Авиационная акустика. В 2-х частях / Мунин А.Г., Самохин В.Ф., Шипов Р.А. и др. — М.: Машиностроение, 1986.
49. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. — М.: Радио и связь, 1988.
50. Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. Е.М. Душина. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
51. Позин И.Л., Шербо В.К. Телеобработка данных в автоматизированных системах. — М.: Статистика, 1976.
52. Полухин Д.А., Орещенко В.М., Морозов В.А. Отработка пневмогидросистем двигательных установок ракет-носителей и космических аппаратов с ЖРД. — М.: Машиностроение, 1987.
53. Приборы для научных исследований и промышленных испытаний в системе КАМАК. — Л.: ЛПО «Вибратор», 1984.

54. Романов В.В., Кубанов В.П. Системы и сети электросвязи. — М.: Радио и связь, 1987.

55. Ротационные методы испытаний приборных устройств / Самсонов Л.М., Каляев А.К., Марков А.В., Поляков С.В., Шевченко А.П. — М.: Машиностроение, 1981.

56. Кабанов Н.Д., Кравченко В.С., Шкамордан А.Н. Семейство микро-ЭВМ М16-1 и перспективы его развития // ВТ соц. стран. 1987. Вып. 22.

57. Фритч В. Применение микропроцессоров в системах управления. — М.: Мир, 1984.

58. Холл А. Основы системотехники. — М.: Наука, 1977.

59. Чернышев А.В. Проектирование стендов для испытания и контроля бортовых систем летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1983.

60. Чернышев А.В. Технология монтажа и испытаний бортовых систем летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1977.

61. Шарактанэ А.С., Железнов И.Г. Испытания сложных систем. — М.: Высш. шк., 1974.

62. Шарактанэ А.С., Железнов И.Г., Ивницкий В.Л. Сложные системы. — М.: Высш. шк., 1977.

63. Шварцман В.О., Емельянов Г.А. Теория передачи дискретной информации. — М.: Связь, 1979.

64. Юсупов Р.М. Элементы теории испытаний и контроля технических систем. — Л.: Энергия, 1978.

65. Яковлев Е.А. Испытания космических электроракетных двигателей установок. — М.: Машиностроение, 1981.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	10
1.1. Ракетно-космический комплекс как сложная техническая система	10
1.1.1. Виды взаимодействий в сложной системе	11
1.1.2. Системный принцип в планировании экспериментальной отработки ЛА	14
1.2. Цели, задачи и общие методы экспериментальной отработки ЛА	19
1.3. Комплексная экспериментальная отработка ЛА	26
1.4. Классификация испытаний	31
1.5. Условия функционирования КЛА	36
Глава 2. НАЗЕМНАЯ ОТРАБОТКА КЛА	50
2.1. Стендовая база для испытаний	50
2.2. Испытания на воздействие механических факторов	54
2.2.1. Статические испытания	55
2.2.2. Вибрационные испытания	64
2.2.3. Испытания на воздействие инерционных нагрузок	105
2.2.4. Испытания на воздействие ударных нагрузок	121
2.2.5. Газодинамические испытания	133
2.2.6. Испытания на воздействие акустических нагрузок	153
2.3. Испытания на воздействие термических факторов	175
2.3.1. Основные методы нагрева	175
2.3.2. Тепловакуумные испытания	210
2.3.3. Теплостатические испытания	212
2.3.4. Огневые испытания	216
2.3.5. Испытания на воздействие отрицательных температур	219
2.4. Испытания на воздействие климатических факторов	224
2.5. Испытания на воздействие радиационных факторов	230
2.5.1. Ионизирующие излучения	230
2.5.2. Источники радиации, применяемые при экспериментальных исследованиях	236
2.6. Испытания на воздействие магнитных полей	249
2.6.1. Электромагнитные испытания	249
2.6.2. Испытания на воздействие внешних магнитных полей	251

2.7. Электрические испытания	252
2.7.1. Проверка электрической прочности изоляции	252
2.7.2. Проверка сопротивления изоляции	255
2.8. Химические испытания	256
2.9. Биологические испытания	259
Глава 3. ПРЕДСТАРТОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ПОДГОТОВКА К ПРОВЕДЕНИЮ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ	261
3.1. Цели и задачи предстартовых и летных испытаний	261
3.2. Принципы проведения предстартовой подготовки и летных испытаний	265
3.3. Объем летных испытаний	273
3.4. Требования к испытательным базам и средствам проведения испытаний	275
3.5. Испытания на технической позиции	278
3.5.1. Испытания блоков ЛА	279
3.5.2. Испытания космического аппарата	281
3.5.3. Испытания ЛА в целом	287
3.5.4. Система комплексных проверок	288
3.6. Испытания на стартовой позиции и пуск ЛА	293
Глава 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ	302
4.1. Система испытаний как объект автоматизации	302
4.1.1. Назначение и состав систем испытаний	302
4.1.2. Обобщенная модель испытаний	307
4.2. Источники и носители информации в системах испытаний	310
4.2.1. Основные понятия и определения	310
4.2.2. Носители информации в автоматических устройствах	315
4.2.3. Модуляция и дискретизация сигналов	316
4.2.4. Преобразование аналоговых сигналов	318
4.2.5. Кодирование сообщений	322
4.3. Автоматизация передачи информации в системах испытаний	331
4.3.1. Виды систем связи	331
4.3.2. Линии и каналы связи	332
4.3.3. Разделение каналов	339
4.3.4. Каналы передачи микропроцессорных и вычислительных систем	341
4.4. Автоматизация измерений	347
4.4.1. Структура и характеристики измерительного канала	347
4.4.2. Элементы измерительных систем	353
4.4.3. Измерительные комплексы и системы	368
4.5. Автоматизация сбора и обработки данных	375
4.5.1. Организация сбора и обработки экспериментальных данных	375
4.5.2. Сбор первичных данных	381
4.5.3. Обработка экспериментальных данных	390
4.6. Автоматизация управления испытаниями	400
ЛИТЕРАТУРА	406

Учебное издание

Афанасьев Владимир Алексеевич
Барсуков Владимир Сергеевич
Гофин Михаил Яковлевич
Захаров Юрий Васильевич
Стрельченко Алексей Николаевич
Шалунов Николай Петрович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Редактор Е.Л. Мочина
Технический редактор Н.Б. Карякина
Корректор А.А. Степанова

ИБ № 44

Лицензия № 040211 от 15.01.1992 г.
Сдано в набор 22.09.92. Подписано в печать 08.09.94.
Формат 60x84 1/16. Бум. тип. № 2. Гарнитура «Литературная».
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 23,94. Уч.-изд. л. 24,91.
Тираж 1500 экз. Зак. 2255. С 121.

Издательство МАИ, 125871, Москва, Волоколамское шоссе, 4
Типография Издательства МАИ, 125871, Москва, Волоколамское
шоссе, 4



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ОТРАБОТКА
КОСМИЧЕСКИХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**