

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

С.И. Ткаченко, О.А. Ткаченко, В.Н. Самсонов

**МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ
ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Учебное пособие

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

Рецензент: д-р техн.наук, профессор В.В.Салмин

Методы экспериментальной отработки прочности конструкций летательных аппаратов: учеб. пособие / С.И. Ткаченко, О.А. Ткаченко, В.Н. Самсонов. – Самара: Изд-во Самар. Гос. аэрокосм. Ун-та, 2007. – 194 с.: ил.

ISBN

Настоящее учебное пособие посвящено наземной экспериментальной отработке прочности летательных аппаратов. В пособии представлены основные положения организации и проведения испытаний ракетно-космической техники, цели, задачи прочностных испытаний. Приведены: описание внешних воздействий на ЛА, методы и технические средства статических, вибрационных, ударных, акустических, ресурсных испытаний. Представлены неразрушающие методы проведения статических и вибрационных испытаний, принципы прогнозирования несущей способности реальных конструкций. Изложен системный подход к организации и проведению конструкторско-прочностной отработки космических летательных аппаратов с учетом их специфики на примерах КА дистанционного зондирования Земли. Рассмотрен ряд примеров из практики подготовки испытаний, эксплуатации испытательного оборудования, обработки и анализа результатов.

Цель пособия – ознакомить студентов аэрокосмических ВУЗов с опытом, накопленным наукой и космической промышленностью в области наземных прочностных испытаний летательных аппаратов. Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 160801 -Ракетостроение, 160802 -Космические летательные аппараты и разгонные блоки, 160201 – Самолето - и вертолетостроение.

Может быть полезным для научных и инженерно-технических работников, занимающихся испытаниями ракетно-космической техники. Выполнено на кафедре «Летательные аппараты» СГАУ.

ISBN

© Самарский Государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева, 2007

© С.И. Ткаченко, 2007

© О.А. Ткаченко, 2007

© В.Н. Самсонов, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	6
Глава 1. Основные положения экспериментальной отработки прочности ракетно-космической техники	7
1.1. Классификация испытаний РКТ	7
1.2. Прочностные испытания, цели и задачи	12
Глава 2. Механические воздействия на космический аппарат.....	15
2.1. Условия эксплуатации конструкции КА	20
2.2. Характеристика механических воздействий и их параметры	16
Глава 3. Основные направления автоматизации конструкторско - прочностной отработки космических аппаратов	22
Глава 4. Статические испытания	29
4.1. Методика проведения статических испытаний	29
4.2. Оборудование лабораторий. Испытательная оснастка.....	32
4.3. Автоматизированные комплексы статических испытаний.....	58
Глава 5. Неразрушающие статические испытания	69
5.1. Обзор методов	69
5.2. Теоретические основы жесткостных методов НСИ	73
5.3. Методика и технические средства обеспечения НСИ.....	88
Глава 6. Вибрационные испытания	102
6.1. Методики и структурные схемы вибрационных испытаний.....	102
6.2. Классификация силового вибрационного оборудования.....	114
6.3. Вибрационные комплексы для отработки изделий РКТ.....	120
6.4. Оснащение ЛВИ и оснастка для обеспечения виброиспытаний КА	137
6.5. Автоматизированные испытательные комплексы для проведения вибрационных испытаний РКТ	151
Глава 7. Неразрушающие вибрационные испытания	161
7.1. Общие положения неразрушающих вибрационных испытаний.....	161
Глава 8. Специальные виды прочностных испытаний КА	163
8.1. Испытания на «транспортабельность»	164
8.2. Испытания «упругого» изделия	166
8.3. Виброакустические, ударные и ресурсные испытания.....	169
8.4. Термопрочностные, криогенно-статические испытания.....	182
Заключение.....	185
Список использованных источников	188

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АКА – автоматический космический аппарат
АО – агрегатный отсек
АРС – автоматизированная расчетная система
АРУ – автоматический регулятор уровня
АСУ – автоматизированная система управления
АСРД – аналоговая система регистрации данных
АСУН – автоматизированная система управления нагружением

АУ – антенное устройство
АЦП – аналого-цифровой преобразователь
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
БА – бортовая аппаратура
БВС – бортовая вычислительная система
БКЧ – блок качания частоты
БКУ – бортовой комплекс управления
БПО – бортовое программное обеспечение
БС – батарея солнечная
ВИ – ведомственные испытания
ВН – вакуумный насос
ВСО – вспомогательное стендовое оборудование
ГО – головной обтекатель
ДД – датчик давления
ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли
ДИ – динамические испытания
ДП – датчик перемещений
ДС – датчик состояния
ДУ – двигательная установка
ЗИ – зачетные испытания
ИИС – информационно-измерительная система
ИО – испытательное оборудование
КА – космический аппарат
КД – конструкторская документация
КДИ – конструкторско-доводочные испытания
КДУ – корректирующая двигательная установка
КИА – контрольно-измерительная аппаратура
КИЦ ЦСКБ – комплексный испытательный центр ЦСКБ
КС – калибровочный стенд
КТИ – контрольно-технологические испытания
ЛА – летательный аппарат
ЛДИ – лаборатория динамических испытаний
ЛЗИ – летные зачетные испытания
ЛКИ – летно-конструкторские испытания
ЛОИ – лабораторно-отработочные испытания
ЛСИ – лаборатория статических испытаний
МВИ – межведомственные испытания
МНС – маслонасосная станция
НДС – напряженно-деформированное состояние
ННБ – нормы надежности и безопасности
ОТК – отдел технического контроля
ПГС – пневмогидросистема
ПЗ – представитель заказчика
ПИ – периодические испытания
ПОБ - программа обеспечения безотказности
ПОН – план обеспечения надежности
ПСИ – приемо-сдаточные испытания
ПТУ – промышленная телевизионная установка
ПУИ – пульт управления испытаниями
ПФЭ – полный факторный эксперимент

РКК – ракетно-космический комплекс
РКТ – ракетно-космическая техника
РН – ракета-носитель
РУЭ – реальные условия эксплуатации
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
СА – спускаемый аппарат
СВ – силовозбудитель
СИ – статические испытания
СИ – средства измерения
СО – склад оснастки
СПН – система пневматического нагружения
СРТ – среднеравновесная температура
СТР – система терморегулирования
СУ – система управления
СУД – система управления движением
ТД – тензодинамометр
ТД – техническая документация
ТЗ – техническое задание
ТИ – типовые испытания
ТТЗ – тактико-техническое задание
ТР – тензорезистор
ТУ – технические условия
УВЧ – ультравысокая частота
УРД – управляющий рулевой двигатель
ЭВТИ – экранно-вакуумная изоляция
ЭГВУ – электрогидравлическая вибрационная установка
ЭД – эксплуатационная документация
ЭДВУ – электродинамическая вибрационная установка
ЭУ – экспериментальная установка

ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание конструкций ракетно-космической техники (РКТ), в том числе космических летательных аппаратов (КЛА), наиболее полно отвечающих условиям эксплуатации, требованиям надежности, а также оптимальных в весовом отношении, приводит как к разработке новых материалов, методов проектирования и расчета, так и к необходимости совершенствования методов экспериментальной отработки прочности изделий. В настоящей работе представлена классификация испытаний РКТ, наиболее распространенные методы статических, вибрационных, ударных, акустических испытаний ракетно-космической техники, а также реализующие их технические средства. Приведены некоторые положения и результаты неразрушающих статических и вибрационных испытаний, даны рекомендации в области комплексного подхода к повышению эффективности конструкторско-прочностной отработки космических летательных аппаратов в целом.

Изложенный материал базируется на обобщении опыта, приобретенного при создании, модернизации прочностной испытательной базы ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», исследований, проведенных в ЦНИИМаш, СГАУ, а также при решении многих практических задач отработки конструкций автоматических космических аппаратов специального назначения и ракет-носителей среднего класса.

Учебное пособие содержит общие принципы планирования испытаний, справочно-методические данные и практические примеры работ, проводимых при подготовке и проведении прочностных испытаний, которые могут служить основой для подготовки специалистов в области экспериментальных исследований сложных технических систем и быть полезными исследователю при проведении прочностных испытаний изделий аэрокосмической техники.

Пособие предназначено в основном для студентов при подготовке по профессиональным образовательным программам 130600 – Ракетостроение, 130700 – Космические летательные аппараты и разгонные блоки, 071100 – Динамика и прочность машин.

Материалы пособия опираются как на литературные источники, так и на опыт, накопленный в испытательном центре ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», на кафедрах летательных аппаратов и основ конструирования машин СГАУ, сотрудниками которых являются авторы. В основу настоящего пособия положен его депонированный в 1996 году в ВИНТИ вариант (деп. № 3285-В96 от 11.11.1996 г.).

Авторы считают своим долгом выразить глубокую благодарность за помощь и консультации по всему кругу рассматриваемых вопросов сотрудникам СГАУ и ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»: проф.Хазанову Х.С., проф. Лукашову Л.Г., доц. Савельеву Л.М, Сочивко А.А., Комарову С.Д., Старкову В.К., Комарову А.И.,Боровскому А.М. и другим специалистам, принимавшим участие в обсуждении работы и высказавшим много полезных замечаний.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ПРОЧНОСТИ РАКЕТНО – КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ПРОЧНОСТИ РАКЕТНО – КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

1.1. Классификация испытаний РКТ

Проблема создания конструкций РКТ высокого совершенства в прочностном отношении решается на основе системного, комплексного подхода, основу которого составляют математическое и физическое моделирование всех факторов, влияющих на прочность конструкции. При этом решающее значение отводится вопросам нормирования, научного планирования и координации экспериментально-теоретического подтверждения прочности.

Нормы прочности, разрабатываемые головными научно-исследовательскими институтами отрасли, определяют общую стратегию выдачи заключения о прочности конструкции, ее весовой оптимизации, унифицируют способы обеспечения запасов прочности, облегчают взаимную увязку ракетных комплексов и регламентируют методологию задания режимов и способов испытаний. Положение совокупности всех видов прочностных экспериментальных исследований четко определено в общей системе классификации испытаний ракетно-космической техники.

В силу разнообразия и широкого круга задач, решаемых ракетами-носителями и космическими аппаратами, сложившейся в течение многих лет специфики предприятий - разработчиков ракетно-космической техники, до последнего времени не утвердилась единая

классификационная схема испытаний с однозначной терминологией. Созданная же на базе государственных стандартов общего назначения классификация часто является не достаточно точной, а иногда и противоречивой: одним и тем же терминам в различных нормативно-технических документах придается различный смысл или смысл вообще не раскрывается. Рядом организаций предприняты попытки по созданию наиболее удобных и оптимальных классификационных систем испытаний. Кратко представим одну из них.

Обобщенная схема классификации испытаний изделий РКТ, разработанная в ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», представлена на рис. 1.1.

В схеме принята следующая терминология:

Автономные испытания (АИ) - испытания сборочной единицы, при которых отсутствует ее штатное взаимодействие с другими сборочными единицами.

Комплексные испытания (КИ) - испытания сборочной единицы, при которых обеспечивается ее штатное взаимодействие с другими сборочными единицами или при которых такое взаимодействие имитируется в составе комплексного стенда.

Контрольные испытания - проводятся с целью контроля качества изделия, т.е. его соответствия требованиям конструкторской документации (КД).

Отработочные испытания - проводятся с целью отработки изделия и комплекта КД на соответствие требованиям технического задания (ТЗ).

Предварительные испытания - контрольные испытания изделий проводятся для определения возможности предъявления их на приемочные испытания.

Приемочные испытания - контрольные испытания изделий проводятся для принятия решения о целесообразности перехода к серийному производству или для передачи в эксплуатацию, а также для опытных образцов единичного производства.

Испытания ОТК - предварительные контрольные испытания проводятся представителями отдела технического контроля (ОТК) предприятия - изготовителя в соответствии с требованиями КД и технической документации (ТД) на всех стадиях изготовления для определения возможности предъявления изготовленной продукции на приемочные испытания.

Наименование классификационной ступени	Наименование испытаний	Классификационный признак
Класс	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 40%;">Автономные испытания</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 40%;">Комплексные испытания</div> </div>	Объект испытаний, характер взаимодействия между объектами испытаний
Тип	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 40%;">Отработочные испытания</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 40%;">Контрольные испытания</div> </div>	Назначение испытаний
Группа	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20%;">Испытания при наземной отработке</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20%;">Натурные испытания</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20%;">Приемочные испытания</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20%;">Предварительные испытания</div> </div>	Стадийность изготовления и отработки
Категория	<div style="display: flex; justify-content: space-around; text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">1</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">2</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">3</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">4</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">5</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">6</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">7</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">8</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">9</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">10</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">11</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">12</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 20px; height: 40px;">13</div> </div>	Организационный принцип проведения испытаний
Вид	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">Динамические, на статическую прочность, на транспортабельность, "упругое изделие" и другие</div>	Оцениваемые параметры, вид воздействия

Рис. 1.1. Обобщенная схема классификации испытаний изделий РКТ:
 1 – ЛОИ; 2 – КДИ; 3 – Стендовые испытания; 4 – Специальные испытания; 5 – ЛКИ; 6 – ЛЗИ; 7 – ПИ; 8 – ТИ; 9 – ЗИ;
 10 – МВИ; 11 – Испытания ОТК; 12 – ПСИ; 13 – КТИ

Контрольно-технологические испытания (КТИ) - предварительные контрольные испытания, проводимые представителями ОТК или совместно с представителем заказчика (ПЗ) для выявления и устранения скрытых производственных дефектов и определения возможности предъявления изготовленной продукции на приемо-сдаточные испытания.

Приемо-сдаточные испытания (ПСИ) - предварительные контрольные испытания готовой продукции, проводимые ПЗ для определения возможности проведения приемочных испытаний или для приемки изготовленной продукции на ответственное хранение до завершения приемочных испытаний.

Периодические испытания (ПИ) - приемочные контрольные испытания готовой продукции, проводимые в объемах и в сроки, установленные КД, служат для принятия представителем заказчика решения о передаче готовой продукции в эксплуатацию.

Типовые испытания (ТИ) - приемочные контрольные испытания готовой продукции, проводимые после внесения изменений в ее конструкцию или в технологию изготовления на стадии серийного производства в случаях, оговариваемых КД, для принятия решения о передаче готовой продукции в эксплуатацию.

Межведомственные испытания - приемочные контрольные испытания опытных образцов продукции, проводимые комиссией в составе представителей нескольких министерств, принимавших участие в создании изделия (комплекса), для принятия решения о целесообразности внедрения разработанного изделия в серийное производство или передачи в эксплуатацию.

Ведомственные испытания (ВИ) - то же, но одного министерства.

Испытания при наземной отработке - отработочные испытания, проводимые в наземных условиях с воспроизведением эксплуатационных внешних воздействий при помощи лабораторного, технологического или стендового оборудования.

Натурные испытания - отработочные испытания, проводимые в реальных условиях эксплуатации.

Летно-конструкторские испытания (ЛКИ) - натурные отработочные испытания, проводимые под руководством и по программе разработчика комплекса РКТ с целью его отработки по параметрам или в условиях, которые невозможно или экономически нецелесообразно воспроизводить при наземной отработке.

Летные зачетные испытания (ЛЗИ) - приемочные испытания комплектующих РКТ проводятся в реальных условиях под руководством заказчика (имеют статус межведомственных испытаний).

Лабораторно-отработочные испытания (ЛОИ) - автономные испытания, проводимые при наземной отработке для оценки правильности принятых схемных и конструктивных решений, оценки границ работоспособности изделий, выявления и устранения конструктивных недостатков и доработки критичных к повреждающим нагрузкам элементов конструкции; по результатам ЛОИ принимается решение о разработке рабочего комплекта КД опытного образца или о его уточнении.

Конструкторско-доводочные испытания (КДИ) - автономные испытания, проводимые для отработки разработанного изделия на соответствие требованиям ТЗ, отработки режимов контрольно-технологических испытаний, отработки комплекта КД изделия.

Специальные испытания - испытания при наземной отработке или натурных испытаниях, проводимые для доработки изделия по одному или по нескольким параметрам по специальным программам.

Стендовые испытания - испытания опытных образцов изделий при наземной отработке, проводимые с использованием стендов, имитирующих эксплуатационные условия и штатное взаимодействие со смежными системами.

Необходимо отметить, что схема на рис. 1.1 применима ко всему множеству объектов испытаний: макетам-изделиям (статическому, динамическому, упругому, тепловому, свето-

техническому и др.), технологическому, летному (опытным) изделиям, приемо-сдаточному (если оно не совпадает с летным) и штатному серийному изделиям.

В мировой практике создания изделий ракетно-космической техники используются понятия проектно-конструкторских, квалификационных и приемочных испытаний. В связи с употреблением в дальнейшем изложении некоторых материалов Национального управления по авионавигации и исследованию космического пространства США (NASA) и исследовательских центров ряда стран сопоставим цели и задачи названных испытаний и испытаний по классификационным схемам, применяемым в Российской Федерации.

Проектно-конструкторские испытания - ведутся в рамках наземной отработки и проводятся в процессе эскизного проектирования с целью определения работоспособности выбранной конструктивной схемы образца или его элемента, а также для проверки пригодности принятого технологического процесса изготовления.

Квалификационные испытания - официальные договорные демонстрации того, что разработка, изготовление и сборка, воплощенные в аппаратуре и компьютерных программах, совпадают с требованиями технического задания. Испытания проводятся с целью проверки работоспособности экспериментального образца. При этом изделие подвергается воздействию нагрузок, величина и длительность которых превышают расчетные значения. В первом приближении квалификационными можно считать зачетные статические испытания до разрушения образца.

Выше, при представлении терминологии испытаний, уже давалась общая характеристика *приемочных испытаний*. Однако, учитывая тот факт, что значительную их часть составляют механические, прочностные, представляется необходимым и полезным привести трактовку приемочных испытаний, применяемую в NASA.

В ходе приемочных испытаний, которым подвергается летный образец и его элементы, выявляются дефекты, возникающие вследствие использования несоответствующих материалов, несовершенного технологического процесса изготовления или низкой квалификации рабочих.

Приемочные испытания подразделяются на следующие виды.

1. Производственные, проводимые с целью проверки прочности отдельных деталей.
2. Сборочные, целью которых является проверка работоспособности узлов и агрегатов.
3. Комплексные - с целью проверки работоспособности ракет и космических аппаратов.

Производственные приемочные испытания проводятся для проверки механических характеристик материалов, из которых изготовлены детали, а также качества сварных, клеевых и заклепочных соединений. Производственным приемочным испытаниям подвергают также элементы конструкции, подлежащие термической и поверхностной обработкам и травлению. Эти испытания имеют наибольшее значение для тех элементов конструкции, которые не могут быть должным образом проверены в процессе сборочных и комплексных испытаний.

Сборочные приемочные испытания проводят в тех случаях, когда производственные испытания не обеспечивают проверки качества какого-либо элемента конструкции на соответствие условиям полета образца. Сборочным испытаниям обязательно подвергают топливные баки, баллоны с сжатым газом и агрегаты, состоящие из литых деталей, готовых панелей и узлов с различного рода соединениями. При составлении перечня узлов и агрегатов, нуждающихся в приемочных испытаниях, учитываются ожидаемые нагрузки и условия внешней среды при полете, критические режимы полета, возможность воспроизведения на испытательных стендах критических нагрузок и критических значений параметров внешней среды.

В тех случаях, когда нельзя достаточно надежно проверить работоспособность отдельных элементов КЛА, ракеты-носителя, проводятся комплексные приемочные испытания собранных ступеней РН, блоков или КЛА в сборе.

1.2. Прочностные испытания, цели и задачи

Штриховкой на рис. 1.1 отмечены информационные объекты, которые можно условно отнести к понятию конструкторско-прочностной отработки автоматического космического аппарата или ракеты-носителя. Из общего числа испытаний (их насчитывается более 20), прочностными назовем следующие: динамические (вибрационные, ударные, акустические); испытания на статическую прочность; испытания на транспортабельность; испытания упругого изделия. Цели и задачи этих испытаний определяет содержание настоящего пособия, поэтому их представим таблицей 1.1.

Названные в таблице 1.1 виды испытаний с одной стороны относятся к классу (см. рисунок 1.1) автономных, типу отработочных, группе испытаний наземной отработки и категориям ЛОИ и КДИ; эти испытания, как правило, проводятся КБ и институтами-разработчиками изделий. С другой стороны, прочностные испытания в том или ином объеме входят в программы комплексных испытаний, являются контрольными в группе предварительных и приемочных по категории испытаний ОТК, ПСИ, КТИ, ПИ, ТИ; такие испытания обычно осуществляются заводом-изготовителем.

Одним из завершающих этапов наземной отработки являются так называемые зачетные динамические испытания и зачетные испытания на статическую прочность. Эти испытания по назначению относятся к типу контрольных и служат основанием для составления заключения о прочности изделий и возможности допуска их к летным испытаниям. Они проводятся в лабораторных условиях системой испытательных вибрационных и статических нагрузок, имитирующих условия нагружения изделий в различных условиях эксплуатации. В связи с высокой стоимостью объектов испытаний и значительной длительностью проведения исследований, как правило, экспериментальная отработка КА ведется в ходе зачетных испытаний, т.е. происходит совмещение отработочных и контрольных типов испытаний. Программа испытаний расширяется в следующих случаях: при необходимости проведения конструкторских доработок вследствие недостаточной прочности изделия, либо его элементов; при изменении нагрузок, если они превышают несущую способность, выявленную в результате предшествующих испытаний; при выявлении расчетных случаев и режимов нагружения, не предусмотренных нормами прочности; при существенных изменениях технологии изготовления изделия, либо организации его производства на новом предприятии.

Проведение конструкторско-прочностной отработки КЛА в ходе зачетных испытаний его статического или динамического макетов значительно уменьшает продолжительность отработки изделия, однако, предъявляет повышенные требования к сохранению объекта испытаний от преждевременного несанкционированного разрушения.

Таблица 1.1

Наименование испытаний	Цели испытаний	Задачи испытаний
1	2	3
Динамические	<p>Отработка прочности конструкций при воздействии динамических нагрузок;</p> <p>определение динамических характеристик изделия;</p> <p>проверка работоспособности комплектующих изделий, прошедших воздействие динамических нагрузок;</p> <p>отработка герметичности.</p>	<p>Определение собственных частот отдельных элементов конструкции и всего изделия;</p> <p>определение коэффициентов вибро-передач к узлам крепления комплектующих изделий;</p> <p>оценка работоспособности комплектующих изделий, включая электрически действующие изделия и кинематические узлы, после воздействия вибраций, акустических нагрузок и ударов (вибро- и удароустойчивость);</p> <p>оценка жесткости и деформации конструкции КА, в том числе сохранности положения посадочных плоскостей под приборы высокой точности установки по отношению к осям КА, при вибрационных и ударных перегрузках;</p> <p>оценка сохранности заданной точности юстировки отдельных комплектующих изделий и стабильности геометрических параметров элементов конструкции после воздействия перегрузок;</p> <p>оценка характеристик КА при имитации условий транспортирования;</p> <p>проверка герметичности после воздействия перегрузок;</p> <p>коррекция рабочей документации на КА.</p>
На статическую прочность	<p>Отработка прочности изделия в соответствии с принятыми расчетными случаями нагружения;</p> <p>оценка несущей способности конструкции и отдельных комплектующих изделий, определение статической прочности силовых элементов конструкции.</p>	<p>Экспериментальное подтверждение прочности конструкций КА при расчетных нагрузках;</p> <p>определение разрушающих нагрузок и фактических запасов прочности;</p> <p>исследование и определение напряженно-деформированного состояния конструкций силовых элементов;</p> <p>определение жесткостных характеристик КА;</p> <p>экспериментальная проверка методов расчета конструкции на прочность;</p> <p>проверка работоспособности кинематических узлов после воздействия статических нагрузок;</p> <p>проверка обеспечения заданной точности положения посадочных мест комплектующих изделий, возможности их регулировки (юстировки) после воздействия статических нагрузок;</p> <p>корректировка документации на КА.</p>

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
На транспортability	Проверка прочности конструкции КА при транспортировании различными видами транспорта; отработка контейнера КА и его узлов; проверка работоспособности комплектующих КА после воздействий реальных условий транспортирования.	Оценка прочности и целостности конструкций КА после испытаний; оценка работоспособности механических устройств; всесторонняя проверка конструкции контейнера; оценка работоспособности бортовой аппаратуры, определение ее соответствия заданным характеристикам; проверка сохранности заданных точностей юстировки комплектующих изделий; проверка герметичности КА; корректировка рабочей документации на КА и контейнер.
Испытания упругого изделия	Определение характеристик динамической схемы упругой конструкции в контуре ориентации и стабилизации.	Определение форм и частот колебаний упругой конструкции; определение декрементов колебаний упругой конструкции на частотах, лежащих в области влияния на характеристики каналов стабилизации и ориентации; определение параметров колебаний, возбуждаемых дебалансом масс и импульсной работой исполнительных органов КА в местах установки чувствительных элементов системы ориентации и стабилизации.

ГЛАВА 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ

ГЛАВА 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ

2.1. Условия эксплуатации конструкции КА

Основными объектами отработки прочности в РКТ являются несущие конструкции ракет-носителей, космические аппараты, элементы конструкций жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и др. В процессе эксплуатации ракетные конструкции испытывают воздействие силовых и температурных факторов, которые в конечном итоге определяют силовую схему конструкции и ее массовые показатели.

Период эксплуатации несущих конструкций от изготовления до конца активного существования можно разбить на несколько этапов [33].

1. Монтажно-такелажные работы на заводе изготовителе. Основной вид воздействий – нагружение локально распределенными силами и моментами.

2. Транспортировка железнодорожным или авиационным транспортом. При этом ракетная конструкция через узлы крепления нагружается системой локально распределенных сил, подвергается воздействию транспортировочных нагрузок и вибраций.

3. Стоянка на стартовой позиции. На этом этапе ракета воспринимает массовые и ветровые нагрузки; топливные емкости нагружены внутренним давлением и, кроме того, могут быть захлажены до криогенных температур низкокипящими компонентами топлива.

4. Старт. Возникают осевые усилия от действия ускорения; топливные емкости наддуваются и захлажены; значительной интенсивности достигают вибрации, акустические воздействия, возбуждаемые двигательными установками; воздействуют высокотемпературные газы.

5. Активный участок полета. Наибольшей интенсивности достигают инерционные силы, которые нагружают конструкцию комплексом распределенных и сосредоточенных сил и моментов. Топливные емкости наддуваются и захлажены. В плотных слоях атмосферы на ракету действуют аэродинамические факторы, которые нагружают поверхность внешним давлением, создают дополнительные силовые нагрузки, вызывают нагрев наружной поверхности; действуют вибрации и акустические нагрузки; при разделении ступеней возникают нагрузки ударного типа. Конструкции двигательных установок нагружены высокоинтенсивными силовыми и температурными факторами.

6. Участок орбитального полета. Аппарат подвергается действию инерционных нагрузок, вызванных маневрами, раскрытием антенн и солнечных батарей; при стыковках и расстыковках возникают ударные воздействия; в гермоотсеках действует избыточное внутреннее давление.

7. Спуск и посадка. Аппарат воспринимает сверхвысокие тепловые потоки, инерционные перегрузки и наружное давление, вызванные торможением в плотных слоях атмосферы; при посадке аппарат воспринимает также нагрузки ударного типа.

Каждой операции, совершаемой над аппаратом, присуща своя система вносимых силовых (а также тепловых) факторов и, следовательно, вполне определенное напряженно-деформированное состояние его конструкции. Поэтому, для составления программы прочностных испытаний изделия необходимо выявление всех операций, которым может подвергаться конкретный аппарат в течение всего периода эксплуатации.

2.2. Характеристика механических воздействий и их параметры

Анализируя этапы эксплуатации, можно видеть, что основными с точки зрения обработки прочности являются следующие воздействия: силовые факторы (силы, изгибающие моменты, наружное и внутреннее давления), вибрации, акустические факторы, нагрузки ударного типа, высокие и низкие температуры.

По характеру механического воздействия на конструкцию все внешние силовые факторы разделяются на две группы: поверхностные и объемные (массовые) силовые факторы. Поверхностные физически выражаются давлением газовой среды или жидкости на поверхности тех или иных частей конструкции, а также посредством контакта поверхностей одних элементов конструкции с другими. Простейший пример поверхностного фактора - это аэродинамическое воздействие. Равнодействующая внешнего газового давления на головной обтекатель спутника дает аэродинамическую силу. Тяга реактивного двигателя, являющаяся равнодействующей газового и атмосферного давления, приложенного к внутренней и внешней поверхностям камеры сгорания, передается на корпус ракеты по сравнительно малым площадям контактирующих поверхностей ферменных конструкций. Равнодействующие этих контактных сил условно называются сосредоточенными силами.

На всех этапах полета летательного аппарата на него действуют инерционные силы. Эти объемные (массовые) силы распределяются по всему объему конструкции летательного аппарата. Их значения пропорциональны плотности материала и местному ускорению точек элементов конструкции. Полное ускорение любого элемента конструкции складывается из ускорения силы тяжести, ускорения поступательного движения центра масс КА, углового ускорения относительно центра масс и ускорения упругих колебаний этого элемента. Обычно ускорения представляются в безразмерном виде в единицах ускорения силы тяжести и называются коэффициентами перегрузки.

Силовые факторы, высокие и низкие температуры в процессе эксплуатации меняются во времени сравнительно медленно, поэтому их называют статическими нагрузками. В отличие от них нагружение вибрацией, акустическим воздействием и ударными факторами называют динамическим нагружением. Особенности нагружения современных ракетных конструкций являются комплексность и многофакторность воздействий: одновременно действует несколько различного рода нагрузок, например, силовые факторы, нагрев, захлаживание, вибрации, акустика и т.п.

Силы, изгибающие моменты, внутреннее давление вызывают в конструкциях внутренние напряжения, которые на определенном уровне приводят к потере несущей способности конструкции.

Вибрации и акустические воздействия вызывают знакопеременное напряженное состояние, которое может привести к накоплению в конструкции усталости и к усталостному разрушению. Ударные воздействия с точки зрения прочности опасны тем, что возникающие инерционные перегрузки могут привести к разрушению как самой конструкции, так и мест крепления к ней различных приборов и агрегатов.

Воздействие температур необходимо учитывать по двум причинам. Во-первых, температура влияет на механические свойства: с повышением температуры они обычно понижаются, с понижением – повышаются. Во-вторых, неоднородность температурного поля и самой конструкции приводит к возникновению температурных напряжений, которые в ряде важных случаев могут привести к потере несущей способности.

Нагрузки, действующие на ракетную конструкцию при ее эксплуатации, называют *эксплуатационными нагрузками* ($P^Э$). Условия эксплуатации на разных этапах неравноценны, поэтому из множества эксплуатационных режимов выбирают наиболее опасные с точки зрения прочности. Эти режимы обычно соответствуют экстремальным условиям наземной эксплуатации, полета и спуска. Такие экстремальные режимы эксплуатации называют *расчетными случаями нагружения*.

В реальных условиях эксплуатационные режимы определяются с некоторой погрешностью, имеются отклонения в технологии изготовления, с определенной погрешностью проводится прочностная отработка и т.п. Для учета перечисленных отклонений и других факторов незнания вводится *коэффициент безопасности*. В итоге проектирование конструкции и экспериментальная отработка прочности проводится не на эксплуатационные $P^Э$, а на расчетные нагрузки P^P : $P^P = f \times P^Э$. Коэффициент безопасности f в зависимости от расчетного случая и назначения конструкции может меняться от 1,25 до 2 и выше.

Количественным показателем прочности конструкции является *коэффициент запаса прочности* $\eta = P^{разр} / P^P$, равный отношению разрушающей нагрузки $P^{разр}$ (при котором происходит потеря несущей способности) к расчетной. Если разрушающая нагрузка определена в результате расчета на прочность, то коэффициент запаса прочности называют расчетным (η^P). В том случае, когда разрушающая нагрузка получена в результате испытаний конструкции до разрушения, говорят о фактическом запасе прочности ($\eta^ф$). Проч-

ность считается обеспеченной, если $\eta^{\phi} \geq 1$. Для правильно спроектированной конструкции запас прочности обычно близок к единице.

При определении прочностных характеристик космического аппарата, как правило, отдельно проводятся исследования на воздействие линейных ускорений и ускорений упругих колебаний элементов конструкции. В первом случае силовой фактор относится к категории квазистатических, во втором - к категории динамических.

При расчетах и испытаниях конструкции, ее элементов и аппаратуры КА на воздействие линейных ускорений, последние обычно считаются равными максимальному значению за время их действия, либо изменяющихся по ступенчатому или линейному закону. В технических условиях на испытуемое изделие обычно задают закон изменения ускорения во времени $a(t)$ и длительность его действия в виде ступенчатой функции (см. рис.2.1).

Необходимо сразу отметить, что массовые силы, создаваемые линейными ускорениями практически не поддаются ослаблению. Повышение прочности элементов конструкции может быть достигнуто только за счет применения материалов с более высоким отношением $[\sigma]/\rho$, где $[\sigma]$ - допустимое напряжение, ρ - плотность материала. Способы имитации линейных ускорений изложены в главе статических испытаний.

Динамическое нагружение, связанное с возникновением упругих колебаний в конструкции, носит, как правило, поверхностный характер и по закону изменения во времени может разделяться на стационарное и нестационарное, детерминированное, при котором текущие значения рассматриваемого силового фактора однозначно определяются по его начальному значению, и случайное.

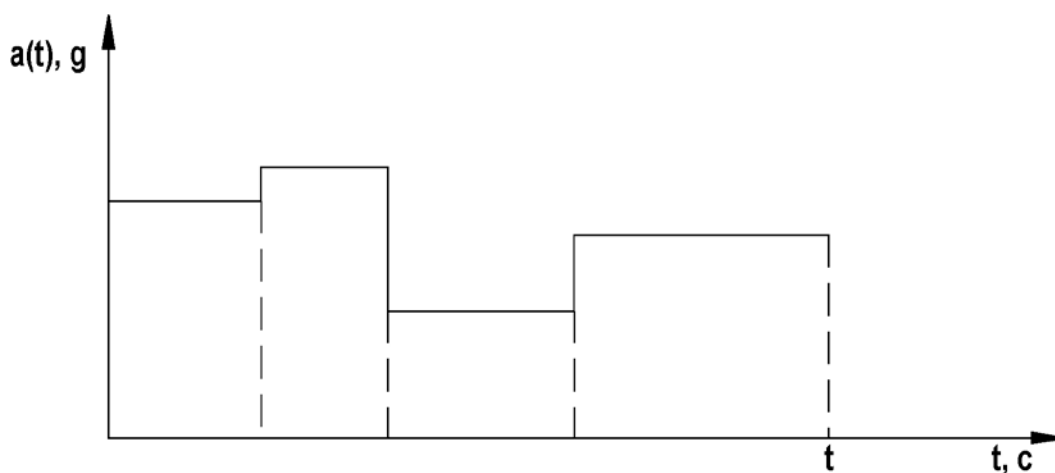


Рис. 2.1. Закон изменения линейного ускорения

Учитывая, что динамические силовые факторы неразрывно связаны с характеристиками и параметрами колебаний конструкции и ее элементов, остановимся подробнее на последних.

Космический аппарат на всех этапах полета в той или иной мере подвержен вибрации. Под вибрацией конструкции и аппаратуры понимают их механические колебания. Вибрация может быть периодической и случайной. В свою очередь, периодическая вибрация может быть гармонической и полигармонической, а случайная - стационарной, нестационарной, узкополосной и широкополосной.

Сравнительно редко встречающаяся в реальных условиях гармоническая вибрация (рис. 2.2, а) используется при лабораторных испытаниях и анализе сложных форм колебаний конструкции.

Простейшей формой периодической вибрации являются синусоидальные, гармонические колебания, которые характеризуются связанными между собой параметрами, обозначения которых приняты в соответствии с:

- колебательными смещениями $x(t)$;
- скоростью $v(t)$;
- ускорением $a(t)$;
- угловой частотой колебаний ω .

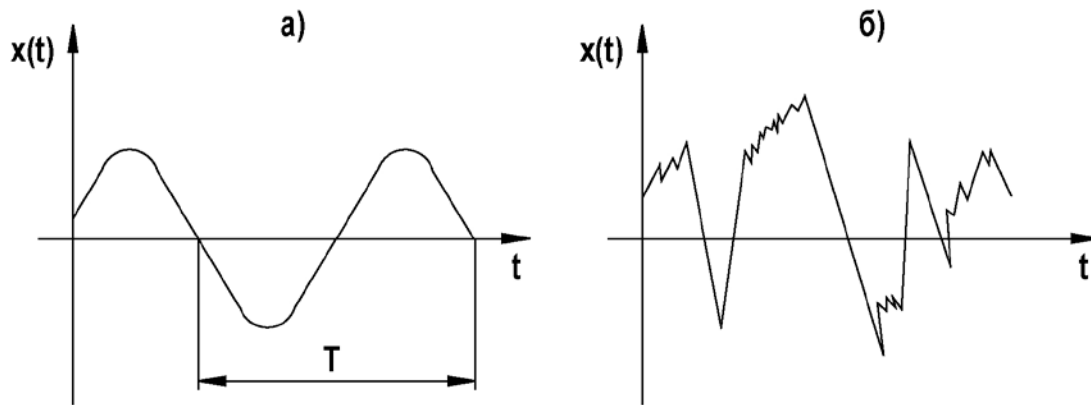


Рис. 2.2. Виды колебаний: а) гармонические, б) случайные

При этом:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi / T, (2.1)$$

где f - частота колебаний, T - период колебаний;

$$x(t) = X_{\text{ник}} \sin \omega t, (2.2)$$

где $X_{\text{ник}}$ - амплитуда колебательного смещения, t - текущее значение времени;

$$v(t) = V_{\text{ник}} \sin(\omega t + \pi / 2), (2.3)$$

где $V_{\text{ник}} = \omega X_{\text{ник}}$ - амплитуда скорости колебаний;

$$a(t) = A_{\text{ник}} \sin(\omega t + \pi), (2.4)$$

где $A_{\text{ник}}$ - амплитуда ускорения.

Полигармонические периодические колебания получаются путем наложения (суммирования) пиковых гармонических колебаний с постоянными во времени параметрами: частотой, амплитудой, фазой.

Изучение реальных колебаний показывает, что в большинстве своем они имеют не только не гармонический (рис. 2.2, а), но и не периодический, а случайный характер (рис. 2.2, б).

Для того чтобы как-то оценить их механические характеристики, необходимо собрать обширный статистический материал. Важнейшим свойством случайного процесса является его стационарность. Если статистические свойства колебательного процесса не зависят от того, с какого момента времени его протекания начата обработка записи, то процесс является стационарным. Иначе говоря, применительно к летательному аппарату, при стационарном внешнем динамическом силовом воздействии режим упругих колебаний его конструкции не изменяется в процессе нагружения, а диапазон частот этих колебаний определяется спектром внешних сил. При нестационарном внешнем силовом воздействии, режим упругих колебаний конструкции является функцией времени, а спектр зависит от скорости

изменения этого воздействия. Для описания основных свойств колебательного случайного во времени процесса $x(t)$ используются следующие статистические функции:

$\bar{x}(t)$ - среднее значение величины $x(t)$;

$\bar{x}^2(t)$ - квадрат среднего значения величины $\bar{x}(t)$;

$$m_x(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \quad (2.5)$$

где $m_x(t)$ - математическое ожидание случайного процесса;

$$D_x(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \bar{x}^2(t) dt, \quad (2.6)$$

где $D_x(t)$ - дисперсия *) случайного процесса;

$$K(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt, \quad (2.7)$$

где $K(\tau)$ - автокорреляционная функция, характеризующая степень зависимости, существующей между значениями случайного процесса в различные моменты времени.

Случайные колебания, возникающие в реальной конструкции, обладают определенным частотным спектром. К описанию спектра случайного процесса подходят с энергетической точки зрения и пользуются понятием спектральной плотности мощности $G(f)$. Спектральной плотностью мощности $G(f)$ называется предел отклонения мощности, приходящейся на участок Δf , к ширине участка, когда она стремится к нулю, и при вибрационных процессах определяется выражением:

$$G(t) = \lim_{B \rightarrow 0} \frac{a^2}{B}, \quad (2.8)$$

где a - среднеквадратичная величина ускорения, м/с²;

B - полоса рассматриваемых частот, Гц.

Для простейшего случая задания, так называемого плоского спектра, (колебания точек конструкции в одной плоскости) зависимость между действующим значением ускорения и спектральной плотностью мощности имеет вид:

$$a_D = \sqrt{GB}. \quad (2.9)$$

Нестационарные процессы имеют те же характеристики, что и стационарные, однако изменяющиеся во времени. На практике нестационарные процессы с различными допущениями стараются заменить на стационарные.

Приведем в справочном порядке единицы измерений параметров вибраций. Частота вибрации измеряется в герцах (Гц), период колебаний и круговая частота - в секундах (с) и

*) Дисперсия по своему физическому смыслу представляет мощность переменных составляющих случайного колебания, причем она зависит от применяемого закона распределения плотности вероятности, как правило, так называемого нормального распределения Гаусса.

радианах на секунду (рад/с) соответственно. Фаза измеряется в радианах или угловых градусах (1рад. = 57,295°).

Единицами измерений скоростей и ускорений в системах СИ и МКГСС являются 1 м/с и 1 м/с², вибрационного перемещения - 1 м.

Широко используется единица ускорения, равная нормальному ускорению силы тяжести, соответствующего ускорению на широте 45° на уровне моря. Обозначается эта единица g ($1 g = 9,807 \text{ м/с}^2$).

Часто употребляется безразмерный параметр K , называемый коэффициентом перегрузки. Он равен отношению вибрационного или линейного ускорения к ускорению земного притяжения $K = a/g$. Численно он совпадает со значением ускорения, выраженного в g .

Для синусоидальной вибрации значения амплитуды ускорения, амплитуды перемещения и частоты колебаний связаны между собой отношением

$$a = \omega^2 x = (2\pi f)^2 x, \quad (2.10)$$

где a - амплитуда ускорения, м/с²; ω - круговая частота, рад/с; x - амплитуда перемещения, м; f - частота колебаний, Гц;

Или, выраженная в единицах g , амплитуда ускорений будет иметь вид:

$$a = \frac{4\pi^2 f^2 x}{0,807}. \quad (2.11)$$

В случае измерения амплитуды перемещения в миллиметрах выражение (2.11) приобретает вид:

$$a = \frac{f^2 x}{250}. \quad (2.12)$$

Необходимость измерения параметров вибрации в большом диапазоне привела к внедрению логарифмических шкал в виброизмерительных приборах. Это обстоятельство вызвало введение условных относительных единиц измерений - децибел. Уровень интенсивности скорости вибрации в децибелах определяется как двадцатикратный десятичный логарифм отношения абсолютного значения виброскорости v к некоторому начальному уровню v_0 :

$$L = 20 \lg v / v_0. \quad (2.13)$$

За начальный уровень интенсивности вибрации в различных источниках принимается действующее значение виброскорости $v_{ДО} = 5 \cdot 10^{-5}$ мм/с или $v_{ДО} = 0,31$ мм/с. Первое значение порога получено из соотношения между звуковым давлением на уровне порога слышимости и колебательной скоростью в простой звуковой волне, а второе - из субъективного восприятия вибрации и шума. Ускорения, имеющие значение

$$a_{ДО} = (0,3...0,316) \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2,$$

принимают за нулевой порог.

В связи с тем, что из-за ограниченного объема настоящего пособия методы, технические средства измерений, их математическое и метрологическое обеспечение не могут быть в нем подробно рассмотрены, отметим следующее. Измерения в целом представлены в источниках [46,47,48,113], оптико-геометрические методы исследования напряженно-деформированного состояния представлены в работах [5,26,36,39,67,76,95,117,118], метод двумерной фотоупругости - [63,75], бесконтактные голографические измерения - [29,57,73], тензометрия - [75]. Метод акустической эмиссии представлен в работах [4,32],

датчики давления и перемещений – [82,91,114], методы интерферометрических исследований колебаний систем в работах [26,50,119].

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУКТОРСКО-ПРОЧНОСТНОЙ ОТРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Исследования влияния механических воздействий на конструкцию КА является сложной многопараметрической задачей. Растущие требования к надежности конструкции, к увеличению ее ресурса потребовали принципиально нового подхода к регистрации и обработке данных, управлению ходом прочностного эксперимента. Этот подход основан на обязательном и всестороннем применении ЭВМ.

Электронно-вычислительная техника начала активно внедряться в исследования прочности конструкций с 60...70 годов прошлого столетия по следующим причинам.

1. Значительно усложнилась конструкция, стали широко использоваться нетрадиционные композиционные материалы, повысились требования к моделированию реальных условий эксплуатации, что привело к резкому увеличению объемов снимаемой информации, регистрация и обработка которой без ЭВМ не представляется возможной.

2. Возросла стоимость экспериментальных установок, и понадобились способы эффективной математической обработки результатов эксперимента, прогнозирования характеристик изделия.

3. С применением ЭВМ открылась возможность получения конечных результатов по мере набора статистики, что позволило корректировать набор регистрируемых данных и исключать грубые ошибки, а также сократить время анализа полученной информации.

4. Применение ЭВМ расширило сферу постановки новых экспериментов, возможности автоматического управления экспериментом и установками.

5. Наметилась тенденция резкого снижения стоимости малых универсальных ЭВМ по сравнению со специальной аппаратурой.

Первый же опыт применения ЭВМ в экспериментальных исследованиях сложных конструкций привел к созданию мощных баз данных, средств управления базами, образующих автоматизированные банки данных (АБД). АБД позволяют в настоящее время быстро принимать проектировщикам КА правильные технические решения, эффективнее планировать эксперимент.

Выделим следующие основные направления автоматизации физико-механических исследований с применением современных средств вычислительной техники:

– автоматизация простейших операций, в частности, управление шаговым двигателем калибровки преобразователей перемещений, оцифровка сигнала, поддержание какого-либо параметра испытательного стенда (давление, температура) в заданных пределах. Такая система строится на базе микро ЭВМ и простейшей аппаратуры сопряжения, взятой, например, из стандарта КАМАК (САМАС), рассмотренного ниже;

– автоматизация сбора и обработки данных в реальном масштабе времени;

– автоматизация проектирования экспериментальных установок, испытательной оснастки;

– автоматизация управления особо сложными установками типа динамического макета КА;

– автоматизация обработки видеоинформации (фото, муаровых, голографических изображений и т.д.);

– автоматизация корреляции данных отдельных экспериментов, выполняемых на одной установке;

– автоматизация процесса подготовки и создания баз экспериментальных данных;

- создание автоматизированных сетей управления ходом проведения нескольких экспериментов или координации работы большого числа микро ЭВМ посредством центральной ЭВМ;
- автоматизация окончательной обработки экспериментальных данных с использованием библиотеки научных подпрограмм;
- автоматизация теоретических исследований.

Применительно к прочностным испытаниям задачи автоматизации в первом приближении можно конкретизировать следующим образом:

- автоматизация измерений деформаций, перемещений, нагрузок, характеристик вибрации;
- автоматизация процесса метрологической аттестации средств измерений;
- автоматизация калибровки преобразователей перемещений, тензодинамометров, акселерометров и др. датчиковой аппаратуры;
- автоматизация нагружения как статического, так и динамического;
- автоматизация контроля за температурными полями и предельным состоянием объекта испытаний и т.д.

Создание тех или иных автоматизированных систем (АС) связано с решением следующих основных типовых задач.

1. Разработка требований к аппаратным и программным средствам ЭВМ: определение объема памяти, необходимой для регистрации данных измерений; определение количества обрабатываемых программ и объема занимаемой или оперативной памяти; определение необходимой скорости приема информации, потребности в стандартной аппаратуре ввода - вывода и в дисковой памяти; необходимость в арифметическом расширителе; определение требований к операционной системе.

2. Выбор типа применяемых ЭВМ, определение целесообразности создания многоуровневой сети ЭВМ; выбор комплекса технических средств сопряжения (интерфейсов) ЭВМ с ИИС, периферийных устройств автоматизированной системы; решение задачи экономической эффективности эксплуатации того или иного класса ЭВМ в зависимости от их стоимости.

3. Разработка комплекса программ, реализующих алгоритм эксперимента: подготовка базы данных, сбор отсчетов, сортировка, первичная и вторичная обработка, сжатие, представление информации на дисплее, выдача результатов в табличном и графическом виде.

Анализ технологических процессов лабораторно-стендовой отработки элементов и конструкций ЛА позволил выделить в свою очередь основные для всех видов испытаний функционально-законченные задачи (ФЗ). Примерный перечень этих задач в порядке возрастания их сложности перечислен ниже.

Информационно-измерительные задачи:

- планирование испытаний;
- измерение физических параметров объекта испытаний (ОИ) и внешних условий;
- оценка параметров внешней среды и ОИ;
- анализ и прогнозирование состояния ОИ в темпе испытаний;
- управление выдачей воздействий на ОИ;
- диагностирование и поиск неисправностей ОИ;
- регистрация и документирование процесса и результатов измерений;
- индикация параметров испытаний в реальном времени;
- анализ срабатывания блокировок и защиты стендового оборудования от возникновения аварийных ситуаций;
- оперативное отображение информации и рекомендаций по ведению испытаний и управлению стендом;

– обмен информацией с другими системами (например, расчетный комплекс и т.п.).

Задачи управления:

– регулирование отдельных параметров процесса испытаний (объект испытаний, стенд и т.п.);

– формирование и выдача эпизодических управляющих воздействий (защит, блокировок и т.п.);

– многосвязное регулирование параметров процесса испытаний;

– программное управление процессом испытаний, включая стенды, измерительное и вычислительное оборудование;

– оптимальное управление установившимися и неустойчивыми режимами функционирования стендов;

– адаптивное оптимальное управление процессом испытаний в целом.

Перечисленные задачи представляют собой сложные и трудоемкие информационно-измерительные и управляющие процессы, которые реализуются в системах автоматизации испытаний параллельно и связаны между собой потоками информации.

Системный анализ, формализация и алгоритмизация процессов испытаний позволяют представить технологию испытаний в виде типовых технологических операций. Такой подход существенно сокращает сроки разработки технологии испытаний, повышается их качество и гибкость, открываются широкие возможности для эффективной организации автоматизированных испытаний.

Каждая задача решается на основе единства методического, технического, программного, информационного обеспечения.

Состав автоматизированной системы испытаний (АСИ) можно условно представить матрицей:

$S_{1,1}$	$S_{1,2}$	$S_{1,3}$...	$S_{1,K}$
$S_{2,1}$	$S_{2,2}$	$S_{2,3}$...	$S_{2,K}$
$S_{3,1}$	$S_{3,2}$	$S_{3,3}$...	$S_{3,K}$
$S_{4,1}$	$S_{4,2}$	$S_{4,3}$...	$S_{4,K}$

Здесь каждому столбцу соответствует определенная функциональная подсистема, решающая одну из перечисленных выше задач (всего таких задач K). Каждая строка матрицы, взятая с учетом связей между ее элементами, объединяет один и тот же вид обеспечения разных функциональных подсистем и образует, соответственно, ту или иную подсистему обеспечения АСИ.

Совершенство АСИ зависит от проработанности каждого элемента $S(i,j)$ и гибкости связей между ними. Это особенно касается совершенства технического обеспечения каждой подсистемы и ее программного обеспечения. Многое зависит от согласованности пропускных способностей элементов $S(i,j)$, которые должны обеспечивать обработку информации и принятие решений в темпе испытаний (режиме реального времени – РРВ).

Режим РРВ (real time processing) определяется обычно как режим, при котором система, получающая данные от процесса, обрабатывает их по соответствующей программе и выдает полученные результаты с такой скоростью, которая обеспечивает своевременную реакцию системы на изменения, происходящие во внешней среде.

Режим РРВ характеризуется следующими показателями:

– время ответа (реакции) системы на изменение внешних условий (интервал времени между вводом данных и выдачей результирующих данных);

– одновременность (параллельное относительно объекта выполнение программ);

– обработка по приоритетам (обрабатываемые программы могут существенно различаться по значению и важности).

Организация работы системы по приоритетам возможна только с применением системы прерываний. Однако введение лишь одной системы прерываний не дает возможности эффективно использовать ресурсы АСИ (всех ее подсистем). Еще необходима возможность организации параллельной работы отдельных устройств системы.

Анализ особенностей технологических процессов лабораторно-стендовой отработки элементов и конструкций ЛА как объектов автоматизации позволил сформулировать следующие основные требования к архитектуре современных АСИ.

1. Эффективность реализации режимов реального времени АСИ.
2. Программируемость структуры (автоматическая настраиваемость системы на структуру решаемой задачи).
3. Распределенность «интеллекта» (децентрализация средств управления, обработки данных, принятия решений и т.п.).
4. Развиваемость, открытость и наращиваемость всех видов обеспечения системы (продление жизненного цикла).
5. Максимальная унификация, типизация и стандартизация всех функциональных подсистем и видов их обеспечения.
6. Асинхронность взаимодействия подсистем, их модулей и реализуемых процессов.
7. Возможность адаптации и обучения системы, накопления опыта в процессе испытаний.

Степень выполнения этих требований автоматизированными системами испытаний, построенными на базе различных архитектур, отражена в таблице 3.1 [41].

На практике требования, предъявляемые к современным распределенным АСИ (высокая надежность, высокая разрешающая способность, среднее, а в отдельных случаях и высокое быстродействие и т.п.), удовлетворить полностью с помощью систем, построенных на основе интерфейсов НР-ІВ, УСО, КАМАК, не удавалось: либо технические средства не оправдывали своих паспортных гарантий по работе в жестких условиях, либо были недостаточны скорости передачи данных, либо система оказывалась слишком дорогой. По мнению автора работы [42] А.А. Егорова (отдел автоматизации экспериментов МАИ) наиболее перспективными являются системы, построенные на основе шины VMEbus.

Таблица 3.1. Степень реализации требований к архитектуре АСИ

Требования к архитектуре АСИ	Пассивное УСО	АСИ на базе маги-страли НР-ІВ	АСИ на базе маги-страли КАМАК	АСИ на базе маги-страли VME
Эффективность реализации РРВ	неуд.	хорошо	удовлет.	отлично
Программируемость структуры	неуд.	хорошо	удовлет.	отлично
Распределенность «интеллекта»	неуд.	хорошо	удовлет.	отлично
Развиваемость, открытость	неуд.	удовлет.	хорошо	отлично
Унификация, стандартизация	удовлет.	удовлет.	хорошо	отлично
Асинхронность взаимодействия модулей	удовлет.	хорошо	удовлет.	отлично

Это подтверждается тем, что в последние годы отделом автоматизации экспериментов МАИ разработано и введено в опытную эксплуатацию семейство автоматизированных систем прочностных, аэрогазодинамических и теплофизических испытаний моделей и элемен-

тов конструкций ЛА, анализатор динамических процессов электропотребления бортовых устройств космического аппарата, разработаны автоматизированная система контрольно-выборочных испытаний агрегатов летательных аппаратов и модульная микропроцессорная система сбора, обработки и отображения телеметрической информации. Все эти системы построены на базе шины VMEbus и, в основном, с использованием программной среды АССОД.

Программное обеспечение АССОД (авторы разработки С.Вертьев, А.Золотов, М.Мико и В.Приворотский) состоит из программы монитора и набора утилит, выполняющих различные функции, а также программных модулей, непосредственно участвующих в обработке данных.

Все данные в системе представляются в виде файлов единой структуры – DAC-файлов (файлов с расширением DAC).

Любой алгоритм обработки реализуется с помощью набора программных модулей. Последовательность вызовов программных модулей и данные, необходимые для их работы, объединены в программный файл (файл с расширением PRG), написанный на программном языке системы АССОД (PRG-язык). Запуск модулей и обмен данными между ними осуществляет анализатор PRG-файлов.

Используя разработанные программные модули, можно очень быстро изменять алгоритмы проведения и обработки результатов эксперимента.

Для создания методического и программного обеспечения верхнего уровня автоматизированных систем испытаний целесообразным представляется использование программного комплекса Trace Mode, разработанной фирмой AdAstra Research Group [43]. Поскольку система Trace Mode является открытой, состав и структуру измерительно-вычислительных средств определяет полностью разработчик. Система может настраиваться на любые контроллеры (в том числе и выполненные в стандарте VME).

Наличие преобразователей форматов файлов в стандарт ASCII позволяет достаточно просто интегрировать систему на базе Trace Mode с другими системами (например, MATLAB).

Современные автоматизированные системы управления экспериментом в большинстве своем базируются на микропроцессорных (МП) системах. Микропроцессорные средства позволяют создавать разнообразные по сложности выполняемых функций устройства управления - от простейших микроконтроллеров несложных приборов до сложнейших специализированных и универсальных систем распределенного управления в реальном времени. Среди различных форм организации современных МП-средств можно условно выделить следующие группы:

- встраиваемые МП и простейшие микроконтроллеры;
- универсальные микроконтроллеры, специализированные микро-ЭВМ;
- микро-ЭВМ общего назначения;
- мультимикропроцессорные системы;
- аппаратные средства поддержки микропроцессорных систем (расширители).

Особую группу составляют программируемые контроллеры для систем автоматического регулирования. Важнейшим устройством любой системы автоматического регулирования является регулятор, задающий основной закон управления исполнительным механизмом. Замена классических аналоговых регуляторов универсальными программируемыми микроконтроллерами, способными программно перестраиваться на реализацию любых законов регулирования, записанных в память микроконтроллеров, обеспечивает повышение точности, надежности, гибкости, производительности и снижение стоимости систем управления. Большим достоинством универсальных микроконтроллеров является их способность выполнять ряд дополнительных системных функций: автоматическое обнаружение ошибок,

контроль предельных значений параметров, оперативное отображение состояния систем и т.п.

Бурное развитие микропроцессорной техники, промышленных компьютеров (ПК) и контроллеров требует при создании новых высокоэффективных автоматизированных систем тщательной проработки обширной технической информации. Коротко остановимся на тенденциях в развитии вычислительной техники, сформировавшихся к концу 2003 г.:

1) усиление требований к защите окружающей среды и учету общечеловеческих факторов: уменьшение различного вида излучений, включая тепловые, сокращение потребляемой энергии, т.е. появление «зеленых» мониторов, компьютеров, модулей;

2) совершенствование системной архитектуры: развитие мультипроцессинга, расширение номенклатуры интеллектуальных устройств;

3) повышение надежности, отказоустойчивости, быстродействия, уменьшение габаритных размеров и расширение температурных диапазонов;

4) дальнейшее повышение степени интеграции больших интегральных систем (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС).

Воплощение этих тенденций кратко продемонстрируем на достижениях ведущей компьютерной фирмы Intel. Не углубляясь далеко в историю, рассмотрим совершенствование процессора Pentium, промышленный выпуск которого был начат в марте 1993 г.

Объединяя более чем 3,1 миллион транзисторов на одной кремниевой подложке, 32-разрядный Pentium процессор характеризуется высокой производительностью. Суперскалярная архитектура Pentium-процессора представляет собой совместимую только с Intel двухконвейерную промышленную архитектуру, позволяющую процессору достигать новых уровней производительности посредством выполнения более чем одной команды за один период тактовой частоты. Другое революционное усовершенствование, реализованное в Pentium-процессоре, это введение раздельного кэширования. Pentium-процессор позволяет выполнять математические вычисления на более высоком уровне благодаря использованию усовершенствованного встроенного блока вычислений с плавающей запятой.

Отсчет шестого поколения процессоров начался с Pentium Pro, выпущенного осенью 1995 года. Процессор Pentium Pro разрабатывался как мощное средство наращивания быстродействия 32-разрядных приложений для серверов и рабочих станций, систем автоматизированного проектирования, программных пакетов, используемых в машиностроении и научной работе. Мощнейший процессор Pentium Pro насчитывает 5,5 миллионов транзисторов.

7 мая 1997 года в Нью-Йорке корпорация Intel официально представила свой процессор Pentium II, ранее известный под рабочим названием Klamath, который представляет собой – если в общих чертах - Pentium Pro, оснащенный MMX-технологией. В отличие от своего «прародителя», новый процессор нацелен на применение в сферах малого и среднего бизнеса. Он предназначен для установки в настольные ПК, сетевые ПК, рабочие станции и серверы начального уровня.

Насчитывающий 7,5 миллионов транзисторов, процессор Pentium II использует технологию Intel MMX, обеспечивающую эффективную обработку аудио, визуальных и графических данных.

Для «самых простых» компьютеров по 0,25 мкм-технологии фирмой Intel выпущен облегченный вариант процессора, названный Celeron. Процессоры Intel Celeron с тактовыми частотами 500, 466, 433, 400, 366 и 333 МГц ориентированы на рынок компьютеров начального уровня стоимостью 1200 \$. Производительность процессоров Intel Celeron обеспечивает быструю и эффективную работу популярных современных приложений с доступом в Internet.

В 1999 году корпорация Intel представило процессоры Pentium III и процессоры Pentium III Xeon для мощных промышленных компьютеров. Эти процессоры имеют новые

средства хранения системной информации. Основная инновация для пользователей Internet и информативных мультимедиа-приложений – это потоковые SIMD-расширения. Входящие в них 70 новых команд значительно расширяют возможности обработки изображений, 3D-графики, звуковых и видеопотоков, а также распознавания речи.

С 2002 года корпорация производит процессор Intel Pentium IV с технологией Hyper-Threading, обеспечивающей выполнение одним процессором двух потоков программ, что принципиально расширяет возможности использования современных приложений. Тактовая частота процессора увеличена с 133 МГц до 800 МГц, кэш-память второго уровня с улучшенной передачей данных с 250 КБ до 512 КБ.

Одним из крупнейших производителей PC совместимых промышленных компьютеров можно назвать корпорации: Advantech Co., Ltd. (США), Octagon Systems (США), Kontron Embedded Computers (Германия – Канада).

Подробно некоторые автоматизированные системы управления статическими и вибрационными испытаниями рассмотрены в разделах 4.3, 4.4 и 6.5.

ГЛАВА 4. СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

ГЛАВА 4. СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

4.1. Методики проведения статических испытаний

До настоящего времени почти все без исключения статические испытания (СИ) конструкций летательных аппаратов базируются на методе простого поэтапного нагружения. Он состоит в установлении для конструкции испытательных нагрузок, имитирующих расчетные нагрузки в определенных расчетных случаях, и в последующем поэтапном статическом нагружении объекта испытаний в лабораторных условиях до испытательных нагрузок или до разрушения. Такой метод испытаний имеет многолетние традиции и является действенным средством надежной отработки статической прочности конструкций.

На этом общем методическом подходе базируется ряд методик, которые зависят от следующих факторов.

Первый фактор, определяющий методику статических испытаний, это непосредственно тип испытаний. Так, при жесткостных испытаниях, производится поэтапное нагружение конструкции (обычно обеспечивается десятипроцентное приращение усилий) только до эксплуатационных нагрузок. Особое внимание уделяется замерам перемещений контрольных точек изделия (устанавливаются датчики перемещений повышенной точности). Замер деформаций не производится, либо производится в сокращенном объеме.

При периодических, конструкторско-доводочных испытаниях приращение нагрузки от этапа к этапу увеличивается до 25 %. Замеры перемещений и деформаций производятся только по специальным программам.

Зачетные статические испытания предусматривают помимо тщательного контроля нагрузок, НДС и перемещений конструкции, проведение на каждом этапе нагружения прогнозирования коэффициентов запаса прочности и критических нагрузок. При таких испытаниях, как правило, производится экспресс-обработка промежуточных данных эксперимента.

При всех видах статических испытаний должна производиться опрессовка оснастки и всей системы нагружения. При проведении зачетных статических испытаний до разрушения должны быть проработаны меры безопасности, порядок сброса рабочего гидравлического давления в силовых магистралях и системы предохранения силовозбудителей и средств измерения от повреждений.

Вторым фактором, влияющим на методику СИ, является сам объект испытаний, его масса, конфигурация, назначение, состояние на активном участке полета и на орбите.

Рассмотрим некоторые примеры. Оболочковые конструкции, в частности, корпусные части таких АКА, как «Ресурс-Ф1», «Ресурс-Ф2», «Фотон», «Янтарь-2К», «Ресурс-ДК» имеют достаточно большую продольную, поперечную жесткость и, соответственно, малые перемещения точек конструкции. Это позволяет исключить из методики проведения эксперимента операции по отслеживанию направления нагрузок при их увеличении и упрощает процесс замера перемещений. В то же время добавляются операции испытаний отсеков внутренним давлением.

Различны методики проведения СИ ферменных конструкций в раскрытом и сложенном положении. Панели солнечных батарей (БС), подверженные в раскрытом положении действию инерционных нагрузок, испытываются в обезвешенном состоянии следящими системами сил, и в методику испытаний после операций приложения нагрузок добавляются операции контроля системы обезвешивания и направлений испытательных усилий. Та же БС в сложенном положении может быть испытана в центробежном стенде. В этом случае также необходима реализация поэтапного нагружения *).

Накладывает отпечаток на методику проведения СИ наличие жесткостных имитаторов сопрягаемых частей испытываемой конструкции. Так, для автономных испытаний антенных устройств, тепловых экранов, солнечных батарей в большинстве случаев из-за высокой стоимости не изготавливают отсеков, на которых они должны размещаться, а используют только опорные узлы, установленные на жесткостных имитаторах переменной жесткости. Огромное влияние на конечные результаты испытаний оказывает точность настройки этих имитаторов по результатам предварительных экспериментов или расчетов.

Метод статико-динамического нагружения конструкции.

Кроме методик статических и вибродинамических (см. раздел 7.1) испытаний для некоторых агрегатов КА (трубопроводов, двигательных установок и др.) методика экспериментальной отработки прочности должна включать комбинированное воздействие статических и вибродинамических нагрузок. Это обусловлено тем, что статическая составляющая дает значительный вклад в суммарную нагрузку, а низкочастотные колебания оказываются существенным фактором полетного нагружения.

Статическая нагрузка (возрастающая, как и в случае СИ, поэтапно) прикладывается к изделию через эластичные амортизаторы, обеспечивается внутренним давлением (возможно и совместное действие). Штатное опирание объекта испытаний достигается подбором необходимой жесткости технологических опор, на которых закрепляются штатные опоры конструкции. После задания требуемого уровня статической нагрузки, соответствующего исследуемому режиму вибродинамического нагружения, создаются вынужденные колебания системы в заданном режиме с помощью одного или нескольких вибраторов. Уровень статических нагрузок в процессе динамического нагружения остается постоянным.

Проведение статико-динамических испытаний сопряжено с рядом трудностей в замерах статической составляющей суммарной нагрузки и в непрерывном отслеживании ее по заданной программе.

Метод непрерывного квазистатического нагружения.

Конструкция летательного аппарата в процессе летной эксплуатации нагружается внешним давлением, инерционными продольными и поперечными силами, действующими в узлах соединения отсеков, в местах крепления сосредоточенных масс, двигательных установок и органов управления. Каждая из этих нагрузок в период активного существования аппарата изменяется по своему временному закону, так что условия работы конструкции

*) Следует отметить, что в центробежном стенде величина перегрузки в заданной точке объекта зависит от ее расстояния до оси вращения, и необходима методика расчета испытательных нагрузок.

можно рассматривать как квазистатическое сложное нагружение. Временные зависимости нагрузок, представляющие собой интерполяцию расчетных режимов нагружения на всем интервале активного существования аппарата, назовем траекториями нагружения, а их совокупность для всех действующих на конструкцию нагрузок - путем нагружения изделия. Метод непрерывного нагружения состоит в последовательной проверке прочности конструкции в лабораторных условиях реализацией пути активного нагружения в соответствии с заданными траекториями. Длительность испытаний при простом поэтапном нагружении почти на два порядка превышает время активного нагружения летательного аппарата при эксплуатации. Использование метода непрерывного нагружения позволяет существенно уменьшить время испытаний и приблизиться к эксплуатационным условиям работы конструкции. При создании достаточно мощных систем нагружения можно ставить вопрос о воспроизведении полетных квазистатических скоростей нагружения аппарата без какого-либо искажения истинного масштаба времени.

4.2. Оборудование лабораторий. Испытательная оснастка

Состав оборудования лабораторий статических испытаний зависит от задач, решаемых организацией, проводящей эти испытания. Например, в лабораториях при КБ-разработчиках изделий РКТ решаются следующие вопросы:

- отработка прочности силовых узлов и отдельных отсеков на стадии проектирования;
- проведение конструкторско-доводочных испытаний как на реальных объектах, так и на моделях;
- проведение зачетных статических испытаний изделий в сборе;
- проведение периодических, контрольных, типовых испытаний по заказам заводов, не имеющих лабораторий.

Лаборатория статических испытаний (ЛСИ) обычно включает в свой состав производственные помещения и участки:

- зал (залы) испытаний изделий;
- маслonaсосная станция, малогабаритные передвижные насосы и пневмогидравлические станции;
- пультовая управления гидравлическим нагружением;
- пультовая размещения измерительно-вычислительного комплекса;
- пультовая управления экспериментом;
- помещения для калибровки средств измерения;
- помещения для хранения испытательной оснастки и вспомогательного оборудования.

Зал испытаний изделий представляет собой производственное помещение для размещения одного или нескольких испытуемых объектов и приложения к ним заданных испытательных нагрузок. Как правило, зал содержит зону подготовки объекта испытаний и одну или несколько испытательных зон с силовыми полами и силовыми стенами, представляющими собой железобетонные конструкции с силовыми прогонами, которые выполняются из спаренных швеллеров, двутавров или железнодорожных рельсов. Силовые стены изготавливаются совместно с силовым полом. Их количество и расположение диктуются задачами лаборатории. На рис. 4.1 представлены типовые схемы силовых стен и полов, а также наиболее распространенные сечения силовых прогонов (пазов).

Применяемый шаг прогонов 0,5...1,0 м, номинальная отрывающая сила составляет 5,0...10,0 кН/пог.м, изгибающий момент относительно верхнего среза стены не менее 1000 кНм. Площадь пола колеблется от нескольких десятков до тысяч квадратных метров^{*)}.

Силовой пол оборудуется стоками для воды. Пол и стены оснащаются каналами для прокладки масляных, водяных, воздушных трубопроводов, а также герметичными каналами для кабельных сетей.

Зоны подготовки СИ и испытательные зоны оснащаются мостовыми кранами и другими грузоподъемными механизмами.

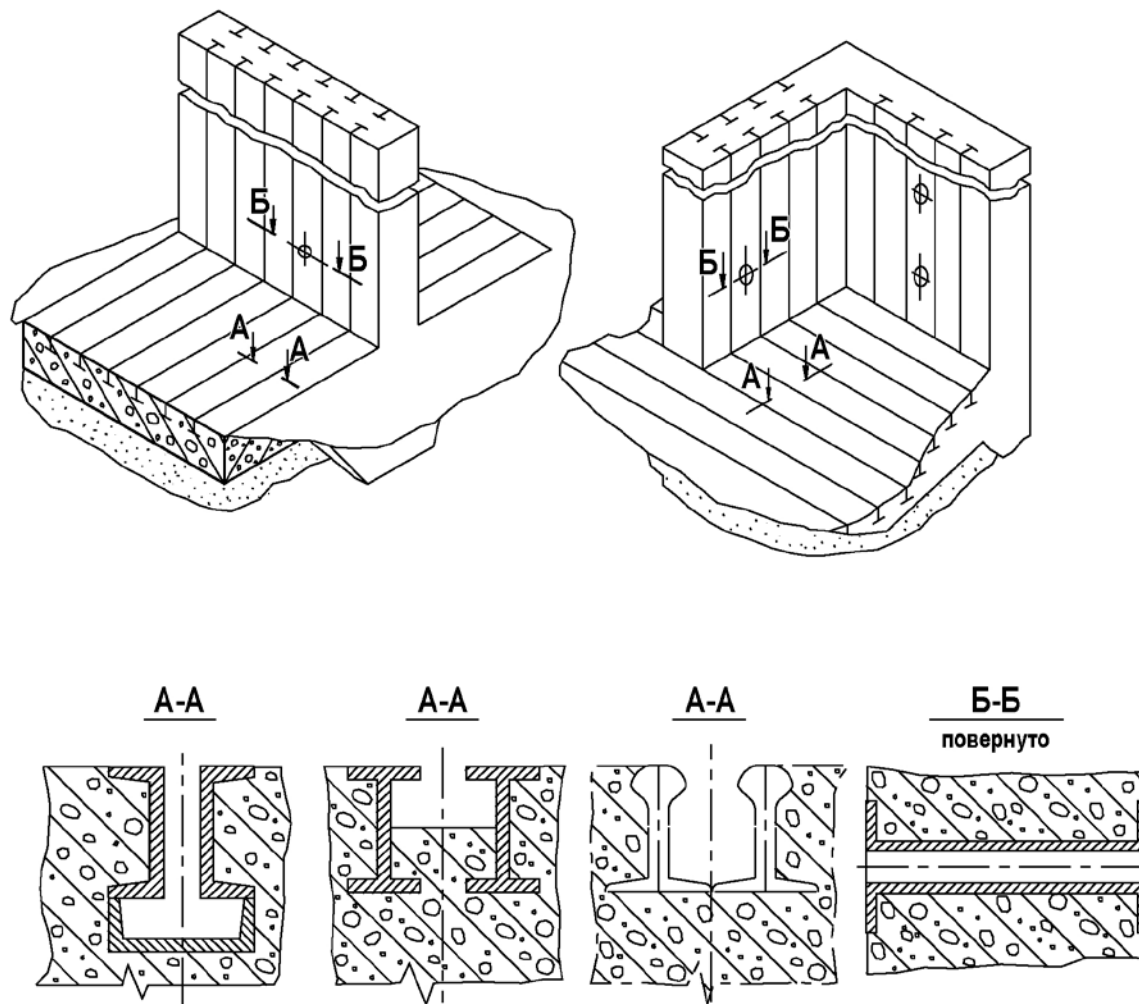


Рис. 4.1. Типовые схемы силовых стен и полов

Для обеспечения возможности произвольного закрепления объекта испытаний на силовом полу или стенах используются переходные плиты, обеспечивающие передачу большого числа сосредоточенных сил на силовые прогоны. Эти плиты (платформы) могут быть неподвижными и поворотными с механизмами фиксации (см. рис. 4.2).

^{*)} Например, площадь силового пола в испытательной лаборатории НИИ ВМС США в Райт-Филде, штат Огайо, составляет 4000 м².

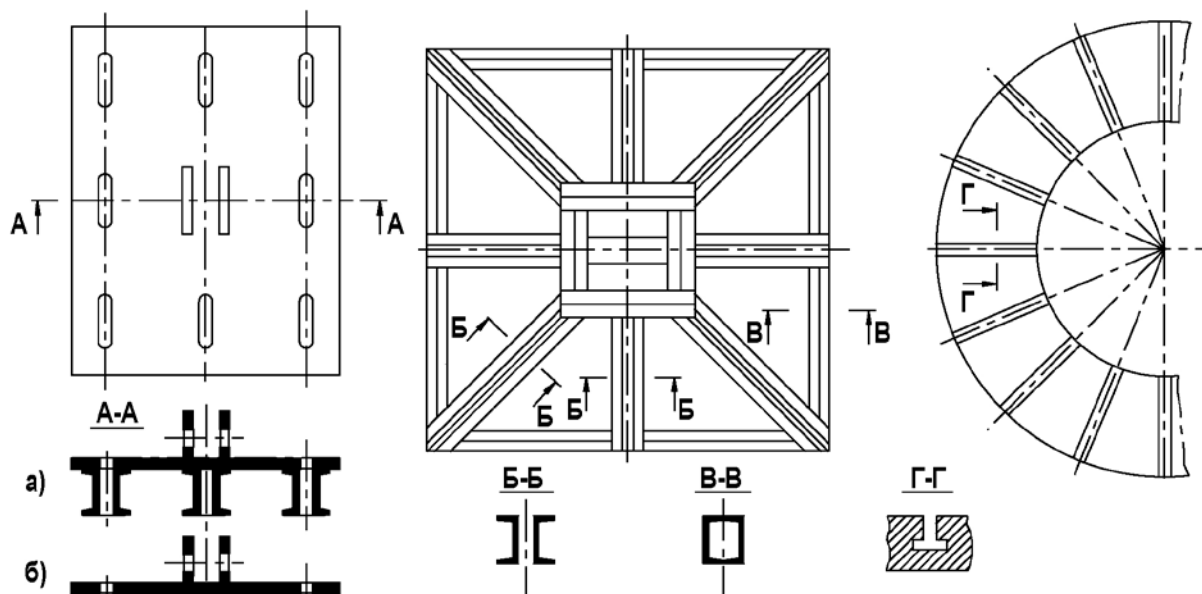


Рис. 4.2. Вид типовых переходных плит

Возможности силовых стен расширяются с помощью силовых угольников различных габаритов. Важными конструктивными элементами испытательного зала являются силовые колонны, балки, порталы. Их внешний вид и типовые сечения приведены на рис. 4.3.

Наличие в лаборатории силового пола, стен, широкой номенклатуры силовых элементов позволяет осуществлять монтаж стендов заданных габаритов и конфигурации для размещения в нем испытуемого изделия. Обычно эти стенды легко трансформируемы и универсальны. Рассмотрим в качестве примера один из таких стендов [100].

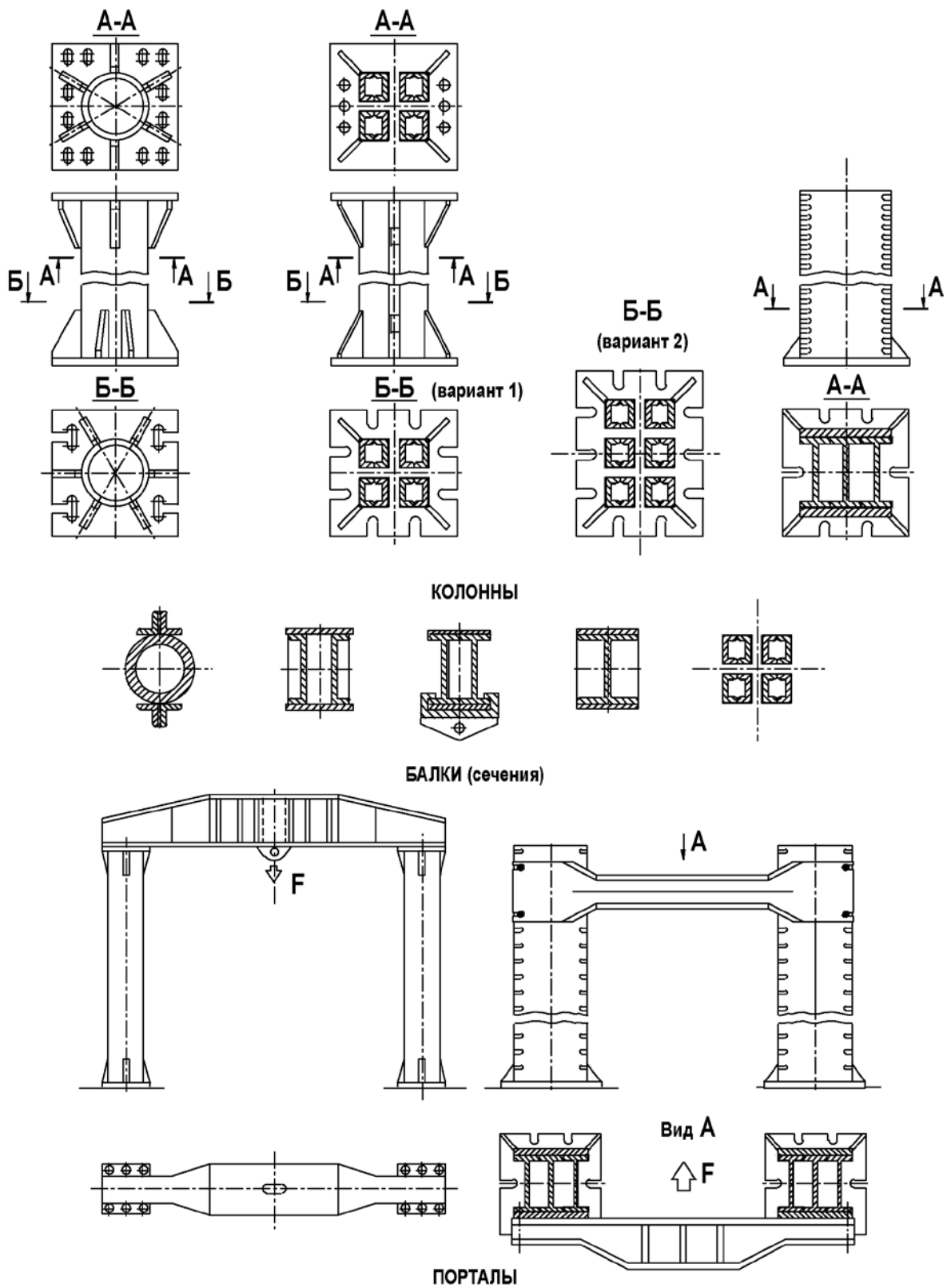


Рис. 4.3. Силовые элементы испытательного зала

Его схема приведена на рис. 4.4. Стенд представляет собой двухконтурную систему, состоящую из силового контура и контура обслуживания. Силовым контуром состоит из двух

взаимо-перпендикулярных силовых стен 1, оснащенных, как и пол, силовыми пазами 2; несущих силовых колонн 3, имеющих гребенки для крепления замыкающих боковых балок 4. Мощные балки 5 образуют силовой потолок контура. Необходимо отметить, что стенд укомплектован набором угловых кронштейнов 6, позволяющих закреплять силовые балки 7 под различными углами к колоннам 3. Балки 7 с установленными на них подвижными и неподвижными блоками составляют основу систем нагружения и обезвешивания таких агрегатов, как солнечные батареи и антенные устройства в раскрытом положении.

Важнейшим элементом стенда является поворотный стол 8, имеющий шестнадцать радиальных пазов для закрепления конструкции. Стол с поворотными механизмами 9 обеспечивает разворот на 360° изделия массой до 30т и передачу на силовой пол изгибающего момента до 2000 кНм.

Использование поворотного стола сокращает монтажные операции по установке испытательной оснастки, силовых цепей, стоек датчиков перемещений практически вдвое. Более того, стол 8 позволяет легко реализовывать приложение результирующих усилий по двум и даже трем направлениям. Необходимый разворот изделия может производиться без помощи крана.

Контур обслуживания состоит из четырех колонн 10, на которых с шагом 0,5 м закрепляются пять этажей площадок обслуживания, состоящих из пристенных секций 11, выдвижных площадок 12 и комбинированных площадок 13, которые могут легко сниматься, выдвигаться и принимать положение, близкое к вертикальному при установке испытуемого изделия на поворотный стол.

Площадки 12 и 13 снабжены червячными механизмами выдвижения, а также страховочно-стыковочными фартуками. Колонны 10 имеют ребра и отверстия, обеспечивающие удобную установку опор трубчатой системы крепления датчиков перемещений. На площадках установлены блоки гидравлических разъемов системы нагружения и электрической системы измерения деформаций, перемещений, давлений и температур.

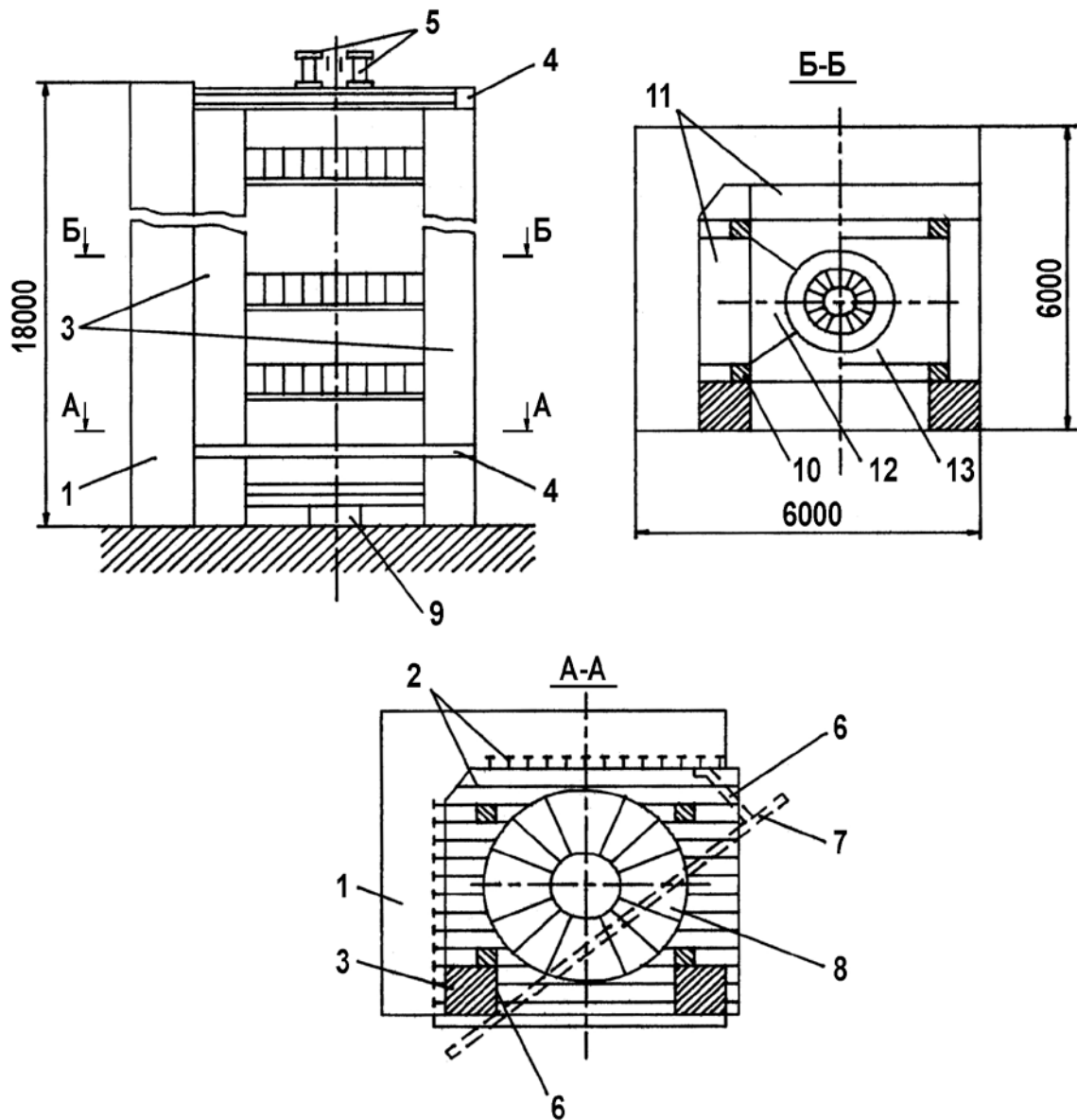


Рис. 4.4. Универсальный трансформируемый стенд для статических испытаний конструкций КА:

- 1 – взаимоперпендикулярные силовые стены; 2 – силовые пары;
 3 – колонны силового контура; 4 – поперечные балки; 5 – балки силового потолка; 6, 7 – кронштейны и балки систем нагружения агрегатов КА;
 8 – поворотный стол; 9 – поворотный механизм; 10...13 – колонны и стационарные выдвижные площадки стапеля обслуживания

На фото рис.4.5 показан описанный стенд с установленным на поворотном столе головным обтекателем РН «Союз».

Рассмотренные силовые конструкции, как правило, предназначены для реализации механического метода нагружения.

Помимо вышеописанных силовых элементов и стендов для приложения нагрузки непосредственно к изделию служит испытательная оснастка. Она может быть как специального назначения, так и универсальной. Специальная оснастка предназначена для отслеживания конфигурации изделия, привязана к его габаритам, посадочным местам и проектируется для каждого испытания вновь, либо подгоняется по месту. Остановимся подробнее на универсальных приспособлениях для нагружения КА механическим методом. К ним относятся: ляжки, кронштейны, бандажи (пояса), хомуты, сферические опоры, силовые кольца, силовые цепи, шарнирные рамы и рычажные системы. Наиболее типичные из этих приспособлений представлены на рис. 4.6.

Механический метод нагружения в основном предназначен для создания сосредоточенных сил и в лабораторных условиях основным техническим средством для этого являются гидравлические силовозбудители, включаемые в состав силовых цепей.

Сосредоточенные силы прикладываются обычно к силовым опорным кронштейнам, и шпангоутам, так что осуществляется локальное нагружение конструкции на некотором участке или в зоне. Такой тип нагружения от приспособления на торцы или сечения объекта испытаний является способом реализации расчетных нагрузок, обычно задаваемых в виде эпюр осевых сил и моментов, переменных по длине конструкции. В практике испытаний эти эпюры заменяются ступенчатыми эпюрами с достаточно малым шагом, после чего на каждом участке прикладывается необходимая комбинация сил и моментов. Схемы нагружения торцевых и промежуточных сечений объекта испытаний приведены на рис. 4.7.

Представляется перспективным использование для создания нагрузок пневматических и гидравлических силовозбудителей, работающих на основе так называемых тортовых технологий [115].

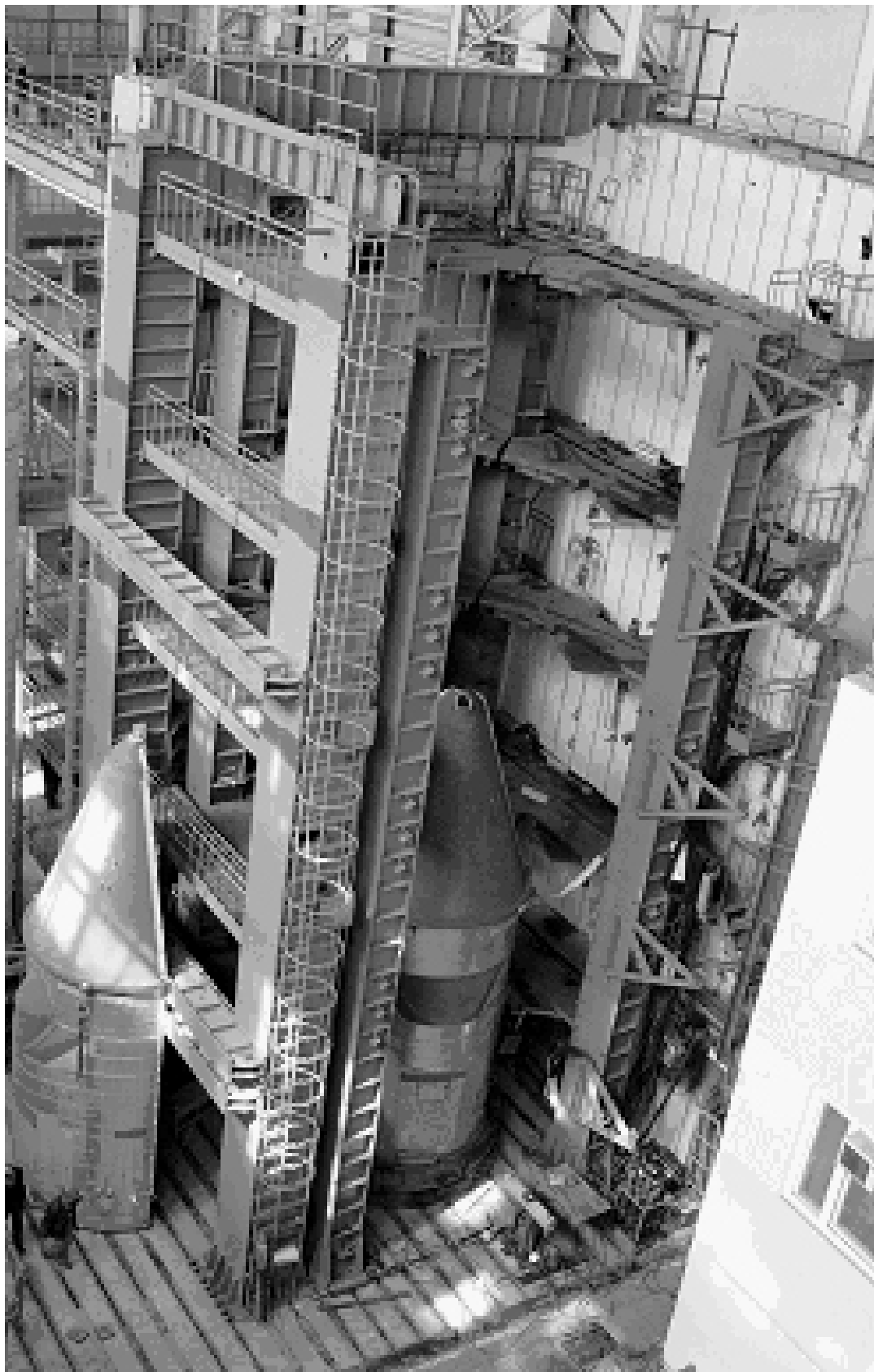


Рис. 4.5. Общий вид трансформируемого стенда для статических испытаний крупногабаритных сборок

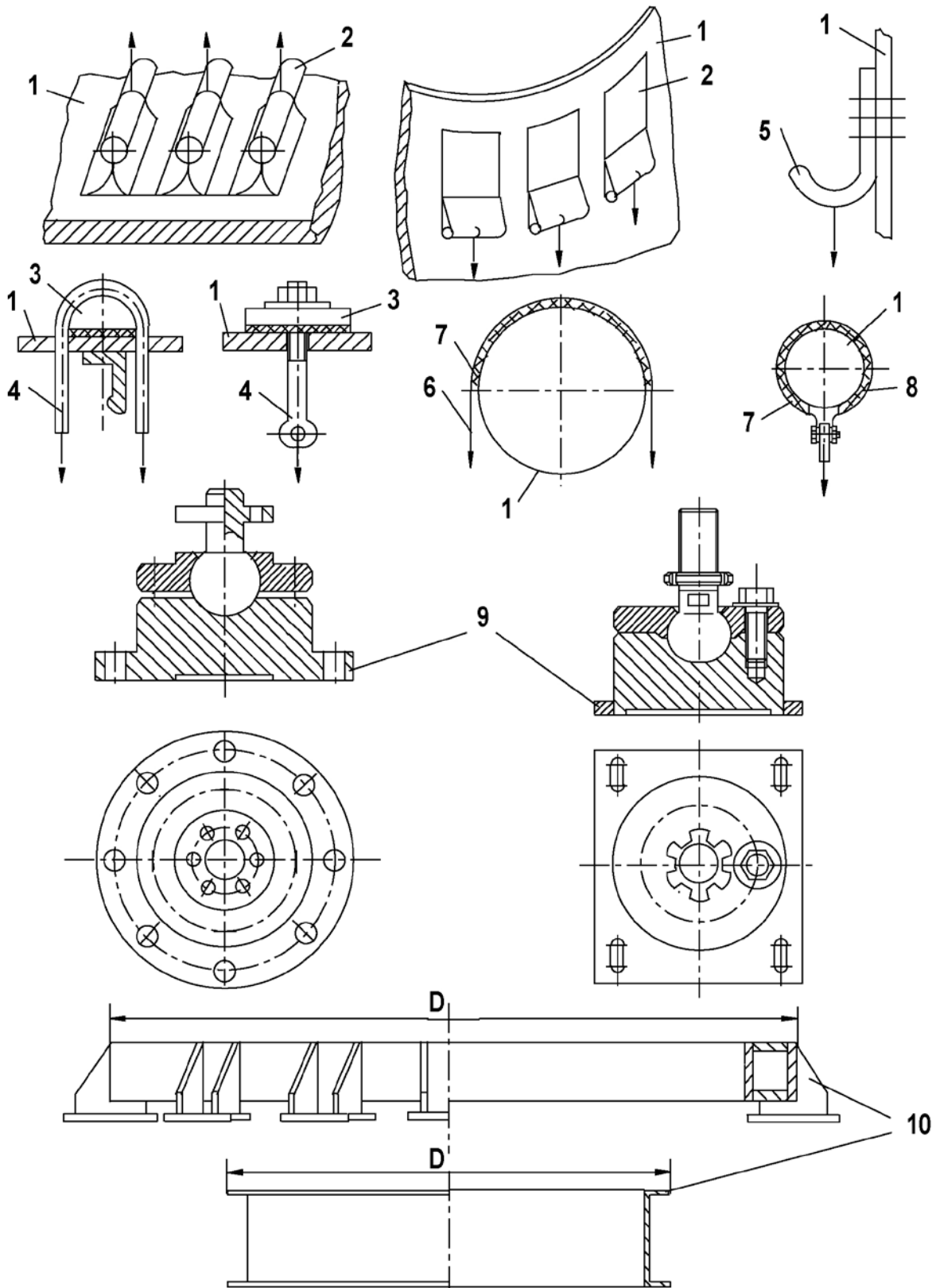


Рис. 4.6. Приспособление для нагружения КА механическим методом:
 1 – объект испытаний; 2 – ляжка; 3 – бобышка; 4 – тяга; 5 – кронштейн;
 6 – пояс (бандаж); 7 – эластичный материал; 8 – хомут;
 9 – сферическая опора; 10 – силовое кольцо

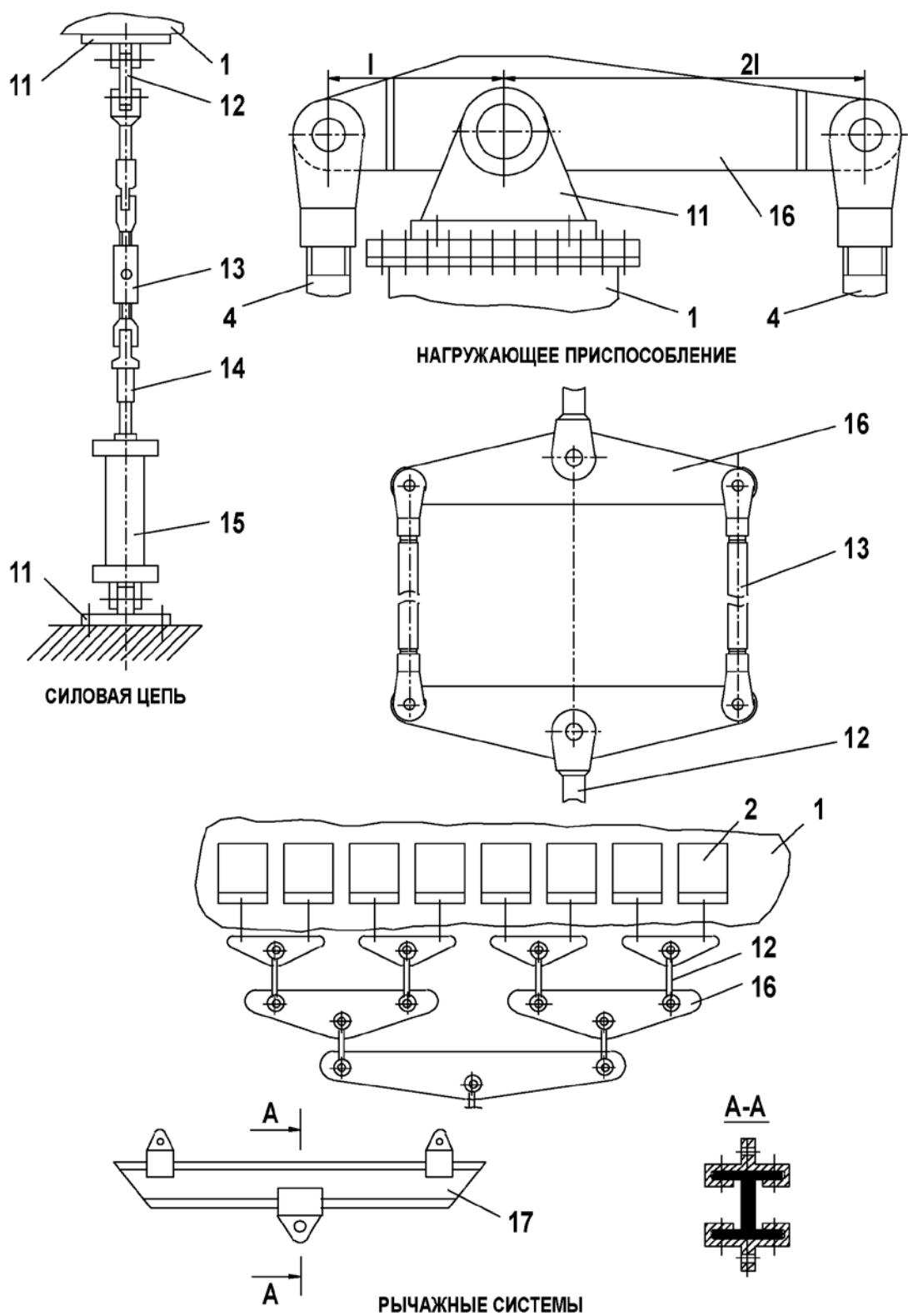


Рис. 4.6 (Продолжение): 11 – кронштейн нагружения; 12 – серьга; 13 – тендер; 14 – тензодинамометр; 15 – гидравлический силовозбудитель; 16 – рычаг; 17 – рычаг с регулируемой длиной плеч

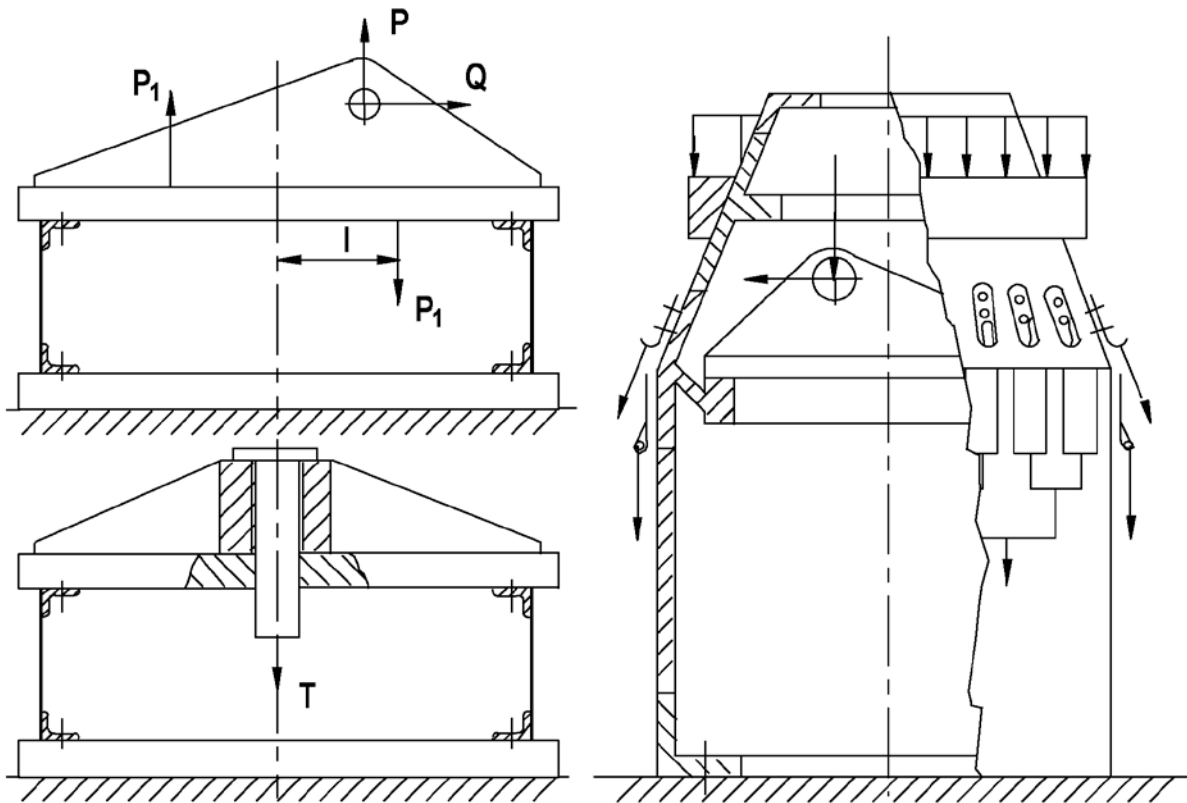


Рис. 4.7. Схемы нагружения торцевых и промежуточных сечений изделия

Помимо силовых конструкций и оснастки для реализации механического метода нагружения испытательный зал оснащается оборудованием для осуществления распределенного давления на конструкцию КА другими методами. Наиболее распространены вакуумный, пневматический и гидравлический

Вакуумный метод применяется для создания внешнего давления на объект в тех случаях, когда максимальное значение испытательного давления не превышает 0,1 МПа (1 атм). Испытания замкнутых емкостей производятся путем откачки воздуха из внутренней, предварительно загерметизированной полости вакуумными насосами. В целях избежания эффекта «вакуумной бомбы» во время нагружения изделия, его внутренние полости заполняют специальными вставками, существенно уменьшающими их объем. Внешний вид установки для испытаний конической части головного обтекателя внешним давлением представлен на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Коническая часть ГО в чехле для проведения испытаний на внешнее давление вакуумным методом

Пневматический метод применяется для обеспечения внешнего или внутреннего давления на поверхности объекта испытаний. Давление воздуха или инертного газа создается в замкнутом объеме изделия с помощью компрессоров или баллонов высокого давления и редукторов. Существенным недостатком пневматического метода является необходимость использования специальных боксов и бронекабин, поскольку, ввиду взрывного характера разрушения, такие испытания могут представлять большую опасность.

Этот недостаток исключается при использовании гидравлического метода, в котором рабочим телом служит вода или технологическая жидкость^{*)}. Давление при этом создается гидравлическими насосами. При заполнении герметизированных емкостей жидкостью необходимо обеспечить дренаж воздуха для ликвидации воздушной подушки. Ввиду того, что

^{*)} Технологической жидкостью, как правило, является не вызывающий коррозию металла изделия раствор хромпика в дистиллированной воде.

возможна утечка жидкости при длительном эксперименте или его задержке, в процессе эксперимента также должен быть предусмотрен дренаж воздуха в целях предохранения емкости от разрушения атмосферным давлением. Необходимость учета гидравлического давления столба жидкости приводит при испытаниях объектов большой высоты к установке разделительных диафрагм или других приспособлений, обеспечивающих независимое нагружение давлением в нескольких емкостях одновременно. Преимуществом гидравлического метода является то, что ввиду несжимаемости жидкости имеется возможность четко определить момент разрушения конструкции, поскольку разрушение сопровождается полным или частичным снятием давления.

Комплексное использование оборудования, реализующего вышеперечисленные методы приложения нагрузок к изделию, позволяет решить задачу статических испытаний как сложных узлов и агрегатов, так и КА в сборе.

На рис. 4.9 представлено фото хвостового отсека блока «И» РН «Русь», подготовленного к статическим испытаниям на внешнее давление.

Для исследования силового воздействия на конструктивные элементы КА при имитации орбитального участка полета используются стенды со следящими системами обезвешивания. Такая система представляет собой набор подвижных кареток, балок и блоков, позволяющих с помощью мерных грузов уравнивать вес каждого элемента конструкции. На рис. 4.10 и фото рис. 4.11 представлены схема и общий вид стенда для испытания солнечной батареи (БС) космического аппарата в раскрытом положении.

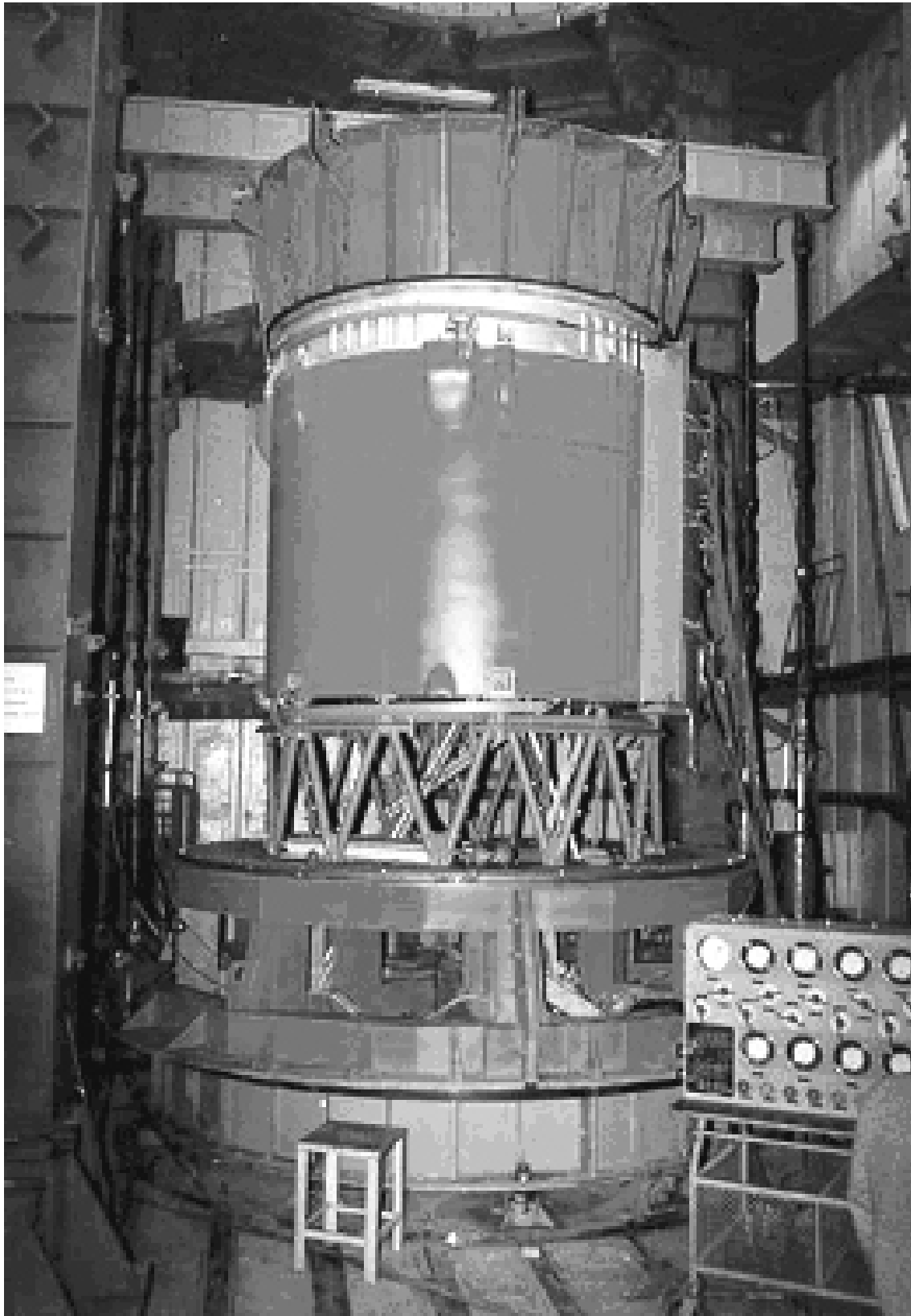


Рис. 4.9. Испытания хвостового отсека блок «И» РН «Русь»
на внешнее давление

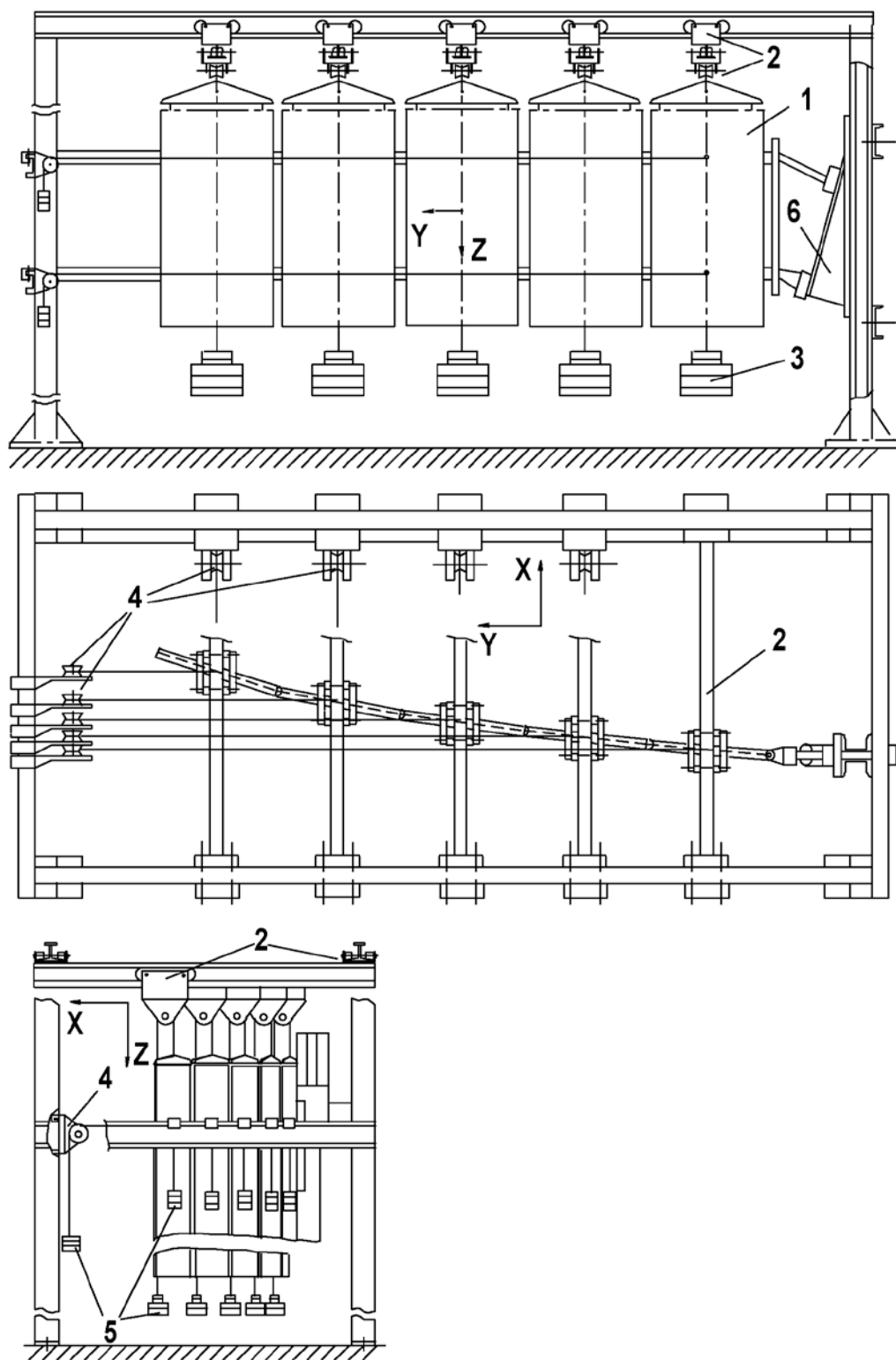


Рис. 4.10. Схема стенда для СИ солнечной батареи в раскрытом состоянии: 1 – испытываемое изделие; 2 – следящая система обезвешивания БС; 3 – грузы системы обезвешивания; 4 – подвижные блоки системы нагружения; 6 – имитатор жесткости КА



Рис. 4.11. Общий вид стенда для испытания БС в раскрытом состоянии

Как правило, в таком стенде, оснащенном системами замера перемещений, проводятся жесткостные испытания БС. Необходимо подчеркнуть конструктивную простоту стенда и возможность отслеживания в нем заданных по осям X, Y, Z направлений испытательных усилий. При высоком качестве изготовления подвижных элементов системы обезвешивания (поз. 2 рис. 4.10) после приложения (мерными грузами) нагрузок очередного этапа происходит самопроизвольное смещение створок БС в новое, близкое к уравновешенному, положение. Окончательное уравновешивание батареи производится установкой подвижных блоков таким образом, чтобы выдерживалась параллельность тяг (и соответственно усилий) исходным направлениям.

Существенным элементом оснащения испытательного зала являются устройства для установки преобразователей перемещений. Обычно, это набор труб, зажимов, державок, переходных элементов, которые объединены в механическую систему, не связанную с нагружаемой конструкцией изделия. В чистом виде это удается только при использовании бесконтактных датчиков перемещений. Усилия, возникающие при контакте индикаторов часового типа с конструкцией, не превышают 0,3Н; преобразователей типа ДП - 4Н, поэтому ими, как правило, пренебрегают.

Системы установки датчиков перемещений должны обеспечивать возможность их отвода от изделия на заданном этапе нагружения при испытаниях до разрушения. Часто эти системы оказываются достаточно сложными, и их монтаж из универсальных элементов весьма трудоемок. В некоторых случаях каркасы, ферменные конструкции для установки датчиков перемещений вокруг изделия проектируются и изготавливаются специально. На

фото рис. 4.12 в качестве примера представлен общий вид установки датчиков перемещений при испытаниях сферического сегмента.

Вторым важнейшим составляющим ЛСИ является *маслонасосная станция* (МНС) и все компоненты гидравлической системы нагружения, а именно: пультаы редуцирования давления, маслораспределительные устройства, силовозбудители.

Рассмотрим их подробнее. Маслонасосные станции предназначены для создания в сети трубопроводов, расположенных в испытательном зале, заданного давления. Обычно маслонасосные станции комплектуются насосами с давлением до 32 МПа и расходом до 100 л/мин ^{*}). Такими насосами могут быть: УН-451 (50 МПа, 8 л/мин), Н-401 (32 МПа, 18 л/мин), НАР-74 (32 МПа, 220л/мин), НП103-5 (21 МПа, 100 л/мин) и др. В практике испытаний гидравлических систем используется и передвижные маслонасосные станции, например, типа «Волна» (АО312П-0000) производства Самарского завода аэродромного оборудования.

Маслонасосные станции состоят из следующих основных агрегатов: емкостей для чистого и грязного масла; насосов высокого давления, оснащенных предохранительно-регулирующими клапанами, настроенными на рабочее давление; системы очистки масла, например, типа СОГ-904А; системы охлаждения масла (как правило, водяной, использующей обратное водоснабжение); стабилизаторов давления (сглаживание пульсаций давления масла); системы запорной арматуры в магистралях высокого и низкого давления. Распределение масла, установка необходимого уровня давления производятся пультами редуцирования давления, обычно размещаемыми за пределами МНС.

^{*}) Известны гидравлические системы фирмы БАКО (Швеция) с рабочим давлением до 100 МПа.



Рис. 4.12. Установка датчиков перемещений при испытаниях сферического сегмента

Принципиальная схема типовой маслонасосной станции, показывающая взаимосвязку перечисленных агрегатов, приведена на рис. 4.13.

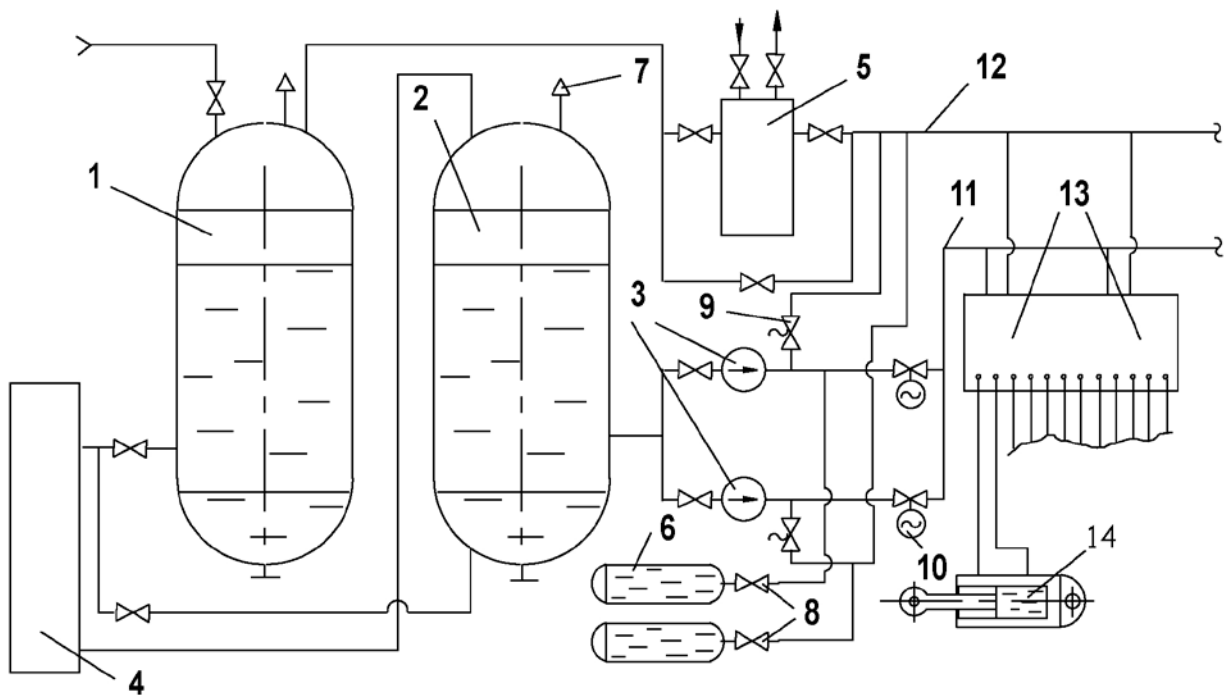


Рис. 4.13. Принципиальная схема маслонасосной станции:

1 – емкость для грязного масла; 2 – емкость для чистого масла; 3 – насосы высокого давления; 4 – система очистки масла; 5 – система охлаждения масла; 6 – пневмогидравлический стабилизатор давления; 7 – дыхательный клапан; 8 – вентиль; 9 – предохранительно-регулирующий вентиль; 10 – вентиль с электроприводом; 11 – магистраль высокого давления; 12 – магистраль низкого давления; 13 – пульт редуцирования давления; 14 – силовозбудитель

Необходимо отметить, что маслонасосные станции на базе вышеназванных насосов требуют при длительной (свыше 30 мин.) работе достаточно мощной системы охлаждения и для ведения ресурсных испытаний плохо приспособлены. Перспективным представляется использование в этих целях частотных преобразователей типа ATV38-132, регулирующих мощность электродвигателей насосов в зависимости от требуемого расхода; а также при повторно-статических испытаниях, испытаниях на долговременную прочность, различных модификаций пневмогидронасосов (ПГН) [28].

Эти силовые агрегаты преобразуют в специальных мультипликаторах энергию сжатого газа в энергию сжатой жидкости. При этом регулировка производительности в ПГН осуществляется не по давлению, а по потребляемому расходу. ПГН обеспечивает постоянное давление жидкости и в тоже время не потребляет мощности при нулевой производительности. Принципиальная схема (система запуска не показана) пневмогидравлической станции разработки МАИ совместно с КВЦ ВАЗ, позволяющая преобразовывать давление воздуха в 0,6 МПа и расходом до 8000 л/мин в давление жидкости (масла АМГ-10) в 25 МПа и расходом до 60 л/мин, приведена на рис. 4.14.

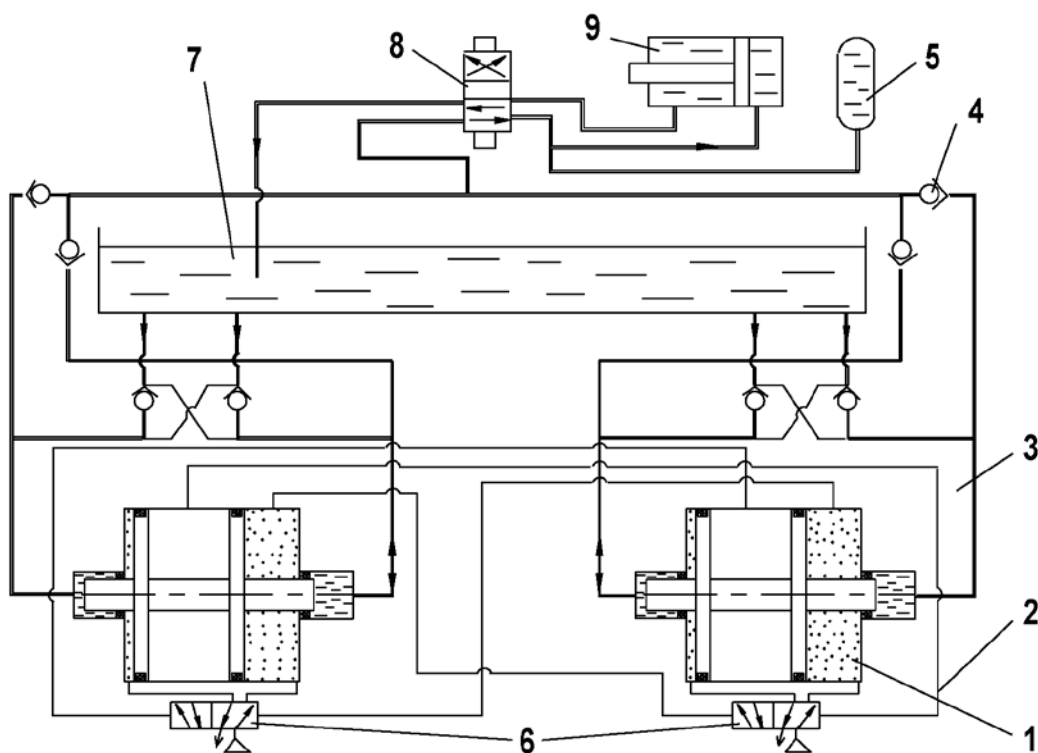


Рис. 4.14. Схема пневмогидравлическая принципиальная станции ПГН-250:

- 1 - мультипликатор; 2 - воздушная магистраль; 3 – гидравлическая магистраль; 4 - клапан обратный управляемый; 5 – гидроаккумулятор; 6 - пневмораспределитель; 7 - маслобак; 8 - гидроклапан; 9 - рабочий гидроцилиндр

Важнейшей особенностью пневмогидравлических станций является отсутствие электрических систем, а также высокое КПД при малых ходах рабочих гидроцилиндров (испытания жестких конструкций) за счет низких затрат энергии только на компенсацию утечек в пневматических и гидравлических системах. Как правило, ПГН мобильны, легко включаются в состав автоматизированных систем, могут располагаться как в помещении МНС, так и непосредственно на испытательных площадках, использовать сетевой воздух низкого давления, широко применяемый на промышленных предприятиях.

Внешний вид станции ПГН-250 представлен на рис. 4.15. Важнейшим управляющим элементом маслонасосной станции являются пультаы редуцирования давления.



Рис. 4.15. Пневмогидравлическая станция типа ПГН-250

Характерным примером такого пульта является пульт типа ПРД-250 на базе агрегата управления (сервоклапана) АУ-38Б (MOOG). Он обеспечивает возможность подачи в силовозбудители масла заданного давления как с помощью вентилялей в ручном режиме, так и автоматически путем подачи управляющих напряжений расчетной величины на электрогидроклапаны и заслонку агрегата управления. Гидравлическая схема секции пульта ПРД-250 представлена на рис. 4.16.

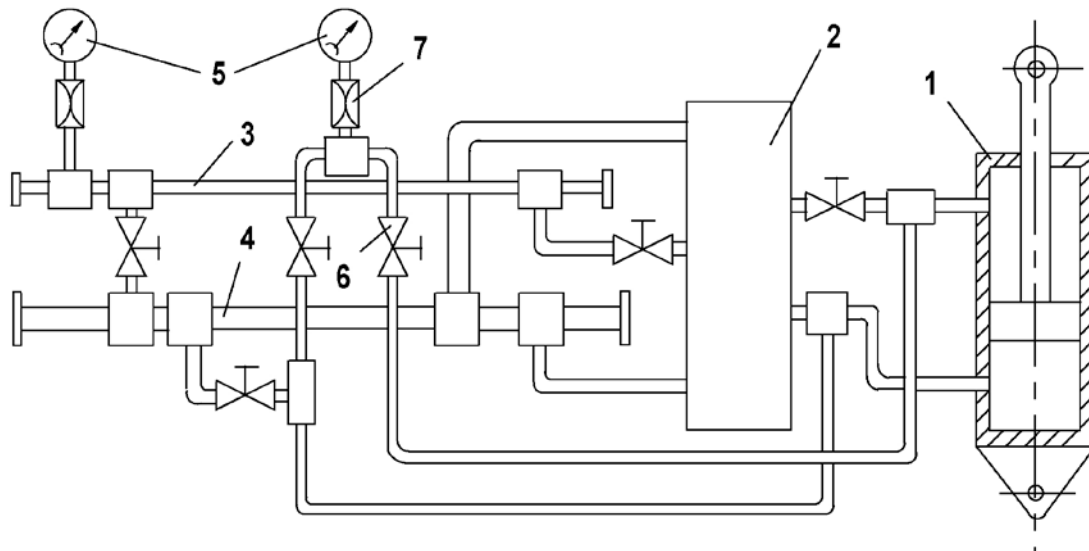


Рис. 4.16. Гидравлическая схема секции пульта редуцирования давления:
 1 - гидравлический силовозбудитель; 2 - агрегат управления АУ-38Б; 3 - магистраль высокого давления; 4 - магистраль низкого давления; 5 - манометр; 6 - вентиль; 7 - дроссель

Внешний вид трехканального пульта ПРД-250 с монитором контроля испытательных нагрузок приведен на фото рис. 4.17.

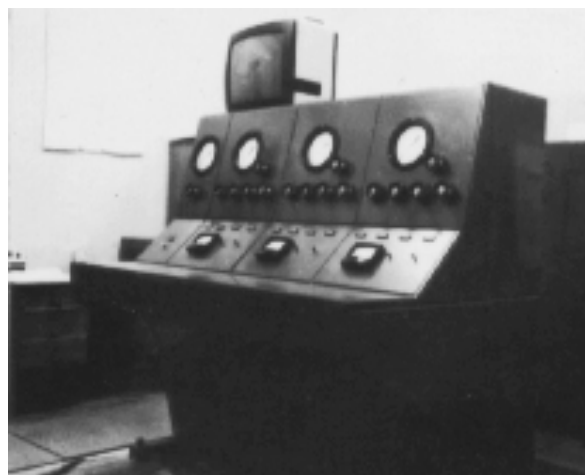


Рис. 4.17. Пульт редуцирования давления типа ПРД-250

Пульты редуцирования давления, входящие в состав автоматической системы нагружения (АСН) размещаются в *пультowych управления гидравлическим нагружением*, имеющих выход маслопроводов на колодки подключения гидроцилиндров, которые устанавливаются непосредственно у изделия на испытательном стенде. В этих пультах могут устанавливаться водяные насосы (ВН), а также пульта редуцирования воздуха высокого давления и вакуумные насосы системы пневматического нагружения. Как правило, ЛСИ подключены к магистралям технологического воздуха высокого и низкого давления, либо имеют собственную компрессорную станцию.

Основным элементом для создания локальных сил, как указывалось выше, является гидравлический силовозбудитель (гидроцилиндр). Силовозбудители серийно изготавливаются следующих номиналов: 10, 20, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 5000 КН при рабочем давлении 25-30 МПа.

Конструктивно силовозбудители различаются только габаритами. Конструкция типового силовозбудителя показана на рис.4.18.

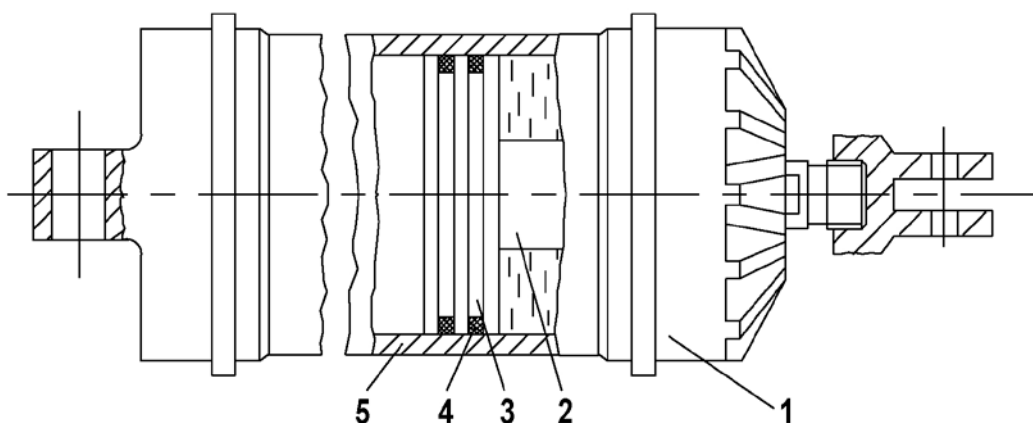


Рис. 4.18. Гидравлический силовозбудитель:
1 - крышка; 2 - шток; 3 - поршень; 4 - уплотнения; 5 - корпус

Подключение гидроцилиндра к пультам редуцирования давления осуществляется стационарными и гибкими маслопроводами через переходные распределительные колодки.

Создание в лабораторных условиях инерционных сил, возникающих от воздействия линейных ускорений, возможно, помимо приведения распределенных нагрузок к сосредоточенным в центробежных стендах (центрифугах). Накоплен достаточно большой опыт применения центрифуг для отработки прочности приборов и агрегатов [48]. Они классифицируются по назначению (испытания на линейные перегрузки, испытания на комплексное воздействие); по нагрузке на плечо (из серийно выпускаемых центрифуг сверхтяжелыми считаются системы с грузоподъемностью свыше 100кг и ускорении свыше 1000 м/с^2); по конструкции (с поворотными и неповоротными столами); по типу привода (электрическим, гидравлическим и комбинированным приводом). В последние годы перспективы использования центрифуг в отработке космической техники расширились в связи с созданием НПО «ЦЕНТР» (г. Минск) мощных центробежных стендов, использующих опору на воздушной подушке. Эти стенды, способные разгонять массу в 3000 кг до 500 м/с^2 и в 1000 кг до 1000 м/с^2 , не имеют опорного вала и подшипников для его установки, а также специальных фундаментов. Для них характерны: низкий уровень вибрации; большие отношения массы испытуемого объекта к общей массе вращающихся частей и общей массы вращающихся частей к массе центрифуги; высокая технологичность изготовления. Конструкция стенда позволяет комплектовать его большим количеством технологической оснастки, необходимой для проведения различных видов испытаний (линейные перегрузки, вибрационное, температурное комплексное воздействие).

Схематично конструкция подобного стенда, эксплуатируемого в НПО «ЭНЕРГИЯ», представлена на рис. 4.19 [125].

Пульты размещения измерительно-вычислительного комплекса в последние годы претерпевают в своем оснащении значительные изменения. Диаграммные регистраторы, силоизмерительные прибора с ручным переключателем каналов и визуальным отсчетом, автономные аналоговые (осциллографические) средства регистрации данных (АСРД) заменяются быстро-действующими информационно-измерительными системами (ИИС), входящими в состав много-уровневых автоматизированных систем. Освободившиеся площади пультовых используются под установку современных средств графического документирования данных эксперимента.

Пульт управления экспериментом - помещение, располагающееся в непосредственной близости к испытательному залу, предназначенное для координации работы служб, участвующих в испытаниях.

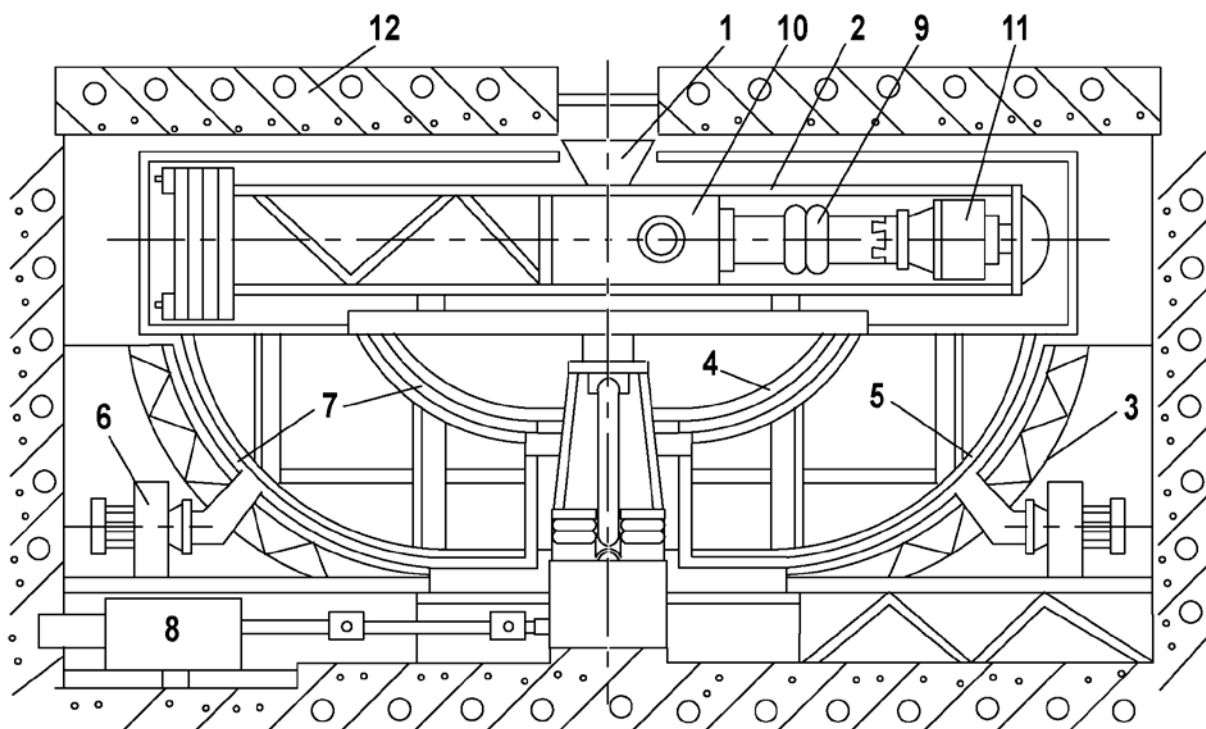


Рис. 4.19. Конструктивная схема центробежного разгонного стенда для испытаний узлов и агрегатов на воздействие линейных и вибрационных ускорений:

- 1 - система подвода энергоносителей; 2 - траверса; 3 - статор;
 4 - малый ротор; 5 - большой ротор; 6 - вентилятор; 7 - воздушная опора; 8 - двигатель ротора; 9 - система разгрузки; 10 - вибростенд;
 11 - объект испытаний; 12 - защитная крышка бункера

В пультовой размещается основа автоматизированного испытательного комплекса (АИК) - автоматизированная система управления и информации, которая осуществляет:

- контроль нагружения испытываемого изделия в соответствии с заданной программой и результатами анализа поступающей информации;
- выдачу предупредительных и аварийных сигналов в технологических системах, системе управления, сбора и обработки информации;
- прекращение эксперимента в аварийных ситуациях;
- сбор и хранение информации, поступающей в процессе эксперимента;
- выдачу результатов экспресс-обработки информации на пульт управления;
- отработку всей собранной информации по окончании эксперимента и представление результатов испытаний в нужной для отчетности форме.

Комплекс технических средств автоматизированной системы управления СИ размещается в большей части на пульте управления испытаний (ПУИ). На пульте располагают мониторы и принтеры ПЭВМ АСУ испытаниями; дублирующую АСУ, предназначенную, в частности, для решения задач прогнозирования несущей способности конструкции, сохранения ее от преждевременного разрушения (см. раздел 5.2); табло контроля работы маслонасосной станции и пультов редуцирования давления с кнопкой аварийного сброса давления; табло или мониторы системы отображения данных (СОД) эксперимента, а также мониторы и блок дистанционного управления промышленной телевизионной установки (ПТУ).

Внешний вид ПУИ лаборатории статических испытаний приведен на фото рис.4.20.



Рис. 4.20. Вид пульта управления испытаниями
в пультовой управления экспериментом ЛСИ

Кроме того, ПУИ оснащен шлемофонной, громкоговорящей, телефонной связью со всеми функциональными зонами ЛСИ. К последним относятся помещения калибровки средств (КС) измерения на калибровочных стендах, а также помещения для хранения испытательной оснастки и вспомогательного оборудования, склада оснастки (СО).

Схема взаимодействия рабочих компонентов ЛСИ, рассмотренных в настоящем параграфе представлена на рис. 4.21.

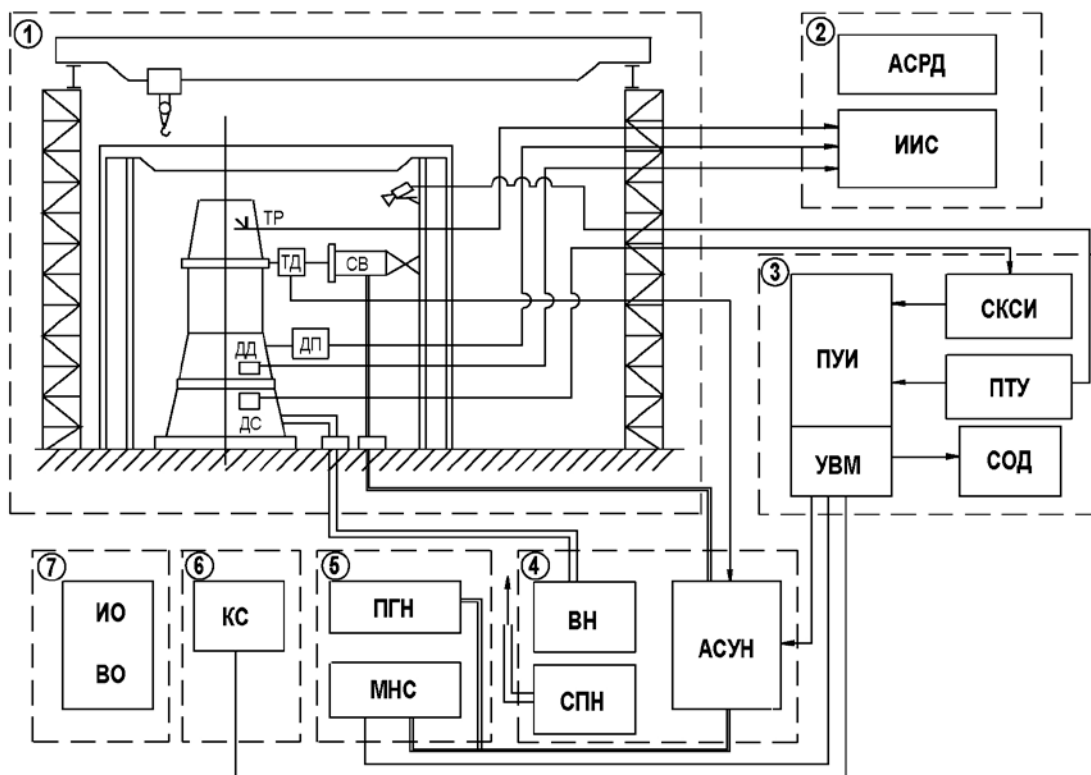


Рис.4.21. Схема взаимодействия рабочих компонентов лаборатории статических испытаний:

- 1 - зал испытаний; 2 - пультовая размещения измерительно-вычислительного комплекса; 3 - пультовая управления экспериментом;
 4 - пультовая управления гидравлическим нагружением; 5 - маслonaсосная станция; 6 - помещения для калибровки; 7 склад испытательной оснастки и вспомогательного оборудования

4.3. Автоматизированные комплексы статических испытаний АКА

Успешное решение задач экспериментальной отработки прочности космических аппаратов невозможно без создания автоматизированных испытательных комплексов (АИК), с помощью которых обеспечивается внешнее воздействие на конструкцию, адекватное воздействиям в реальных условиях эксплуатации. АИК позволяет прикладывать к изделию различные комбинации нагрузок, согласовывать по времени разнородные воздействия, выполнять измерения в достаточно большом объеме, производить анализ результатов эксперимента как в его ходе, так и после окончания. Эти свойства АИК обеспечиваются комплексным применением достижений электроники, вычислительной математики, метрологии, теории подобия, математической статистики, теории информации, теории автоматического регулирования и других наук. АИК строится на основании принципов системного подхода к методологии исследования сложных систем. Они, в общих чертах, заключаются в следующем:

- определение целей и задач функционирования создаваемой системы с позиций более общей системы, частью которой она является (экспериментальная отработка прочности КА - составная часть процесса обеспечения его прочности и разработки оптимальной с прочностной точки зрения конструкции);

- анализ структуры системы, взаимодействия ее элементов и выработки на его основе требований к ним;
- выявление системных качеств, то есть качеств, возникающих как результат взаимодействия всех элементов;
- изучение характера возмущений, происходящих в системе под влиянием отдельных элементов и внешних условий, и определение на его основе мер по исключению отклонений в работе, препятствующих выполнению системой своей основной задачи;
- определение условий оптимального функционирования системы и назначение мероприятий по его обеспечению.

Разработка АИК требует учета как свойств исследуемого объекта, методов и понятий, принятых в данной отрасли науки и вытекающих из них особенностей испытаний, так и возможностей измерительных, управляющих и других устройств. Необходимо правильно выбрать методику эксперимента, обеспечить достаточность и качество снимаемой информации, определить методы анализа данных с учетом особенностей измерительных средств и измеряемых параметров. АИК, являясь частью общей системы обеспечения прочности КА, позволяет не только углубить решения традиционных задач, решаемых в испытаниях, но и расширить их круг. Отвечая целям и задачам статических испытаний, подробно рассмотренным в главе 1, АИК должен удовлетворять требованиям надежности и обеспечивать разработчика КА информацией в объеме, необходимом для весового совершенствования конструкции, оценки достоверности и корректировки расчетных методов, использованных при ее проектировании.

Состав и структурная схема АИК в обобщенном виде [68] приведены на рис. 4.22.

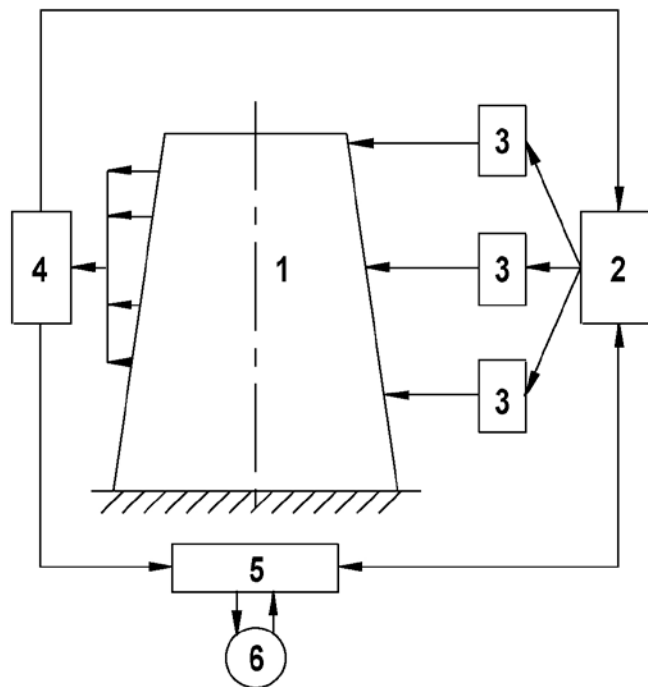


Рис. 4.22. Состав АИК:

- 1 – объект испытаний; 2 – система управления внешними воздействиями (АСН); 3 – устройства, создающие внешние воздействия; 4 – измерительная система (ИИС);
 5 – пульт управления (ПУИ); 6 – испытатель

Автоматизированный измерительный комплекс состоит из вещественной и функциональной частей. Вещественная часть представляет собой: средства закрепления испытуемого

го объекта (механические и гидравлические опоры); средства создания внешних воздействий (силовозбудители, нагреватели, электрогидропневмо-регуляторы); средства измерений (первичные и ИИС); средства управления (устройства связи с ЭВМ, автономные устройства управления, пульт управления); средства представления данных (табло, графопостроитель, алфавитно-цифровое печатающее устройство, дисплей); центральный процессор ЭВМ.

Функциональная часть – это математическое обеспечение ЭВМ; методики работы на АИК; инструкции по эксплуатации АИК, поддержанию комплекса в рабочем состоянии.

Вещественная и функциональная части АИК должны удовлетворять обязательным системным требованиям, таким как: надежность, возможность сопряжения отдельных элементов (согласованность по входу и выходу); быстродействие (способность воспринимать и перерабатывать в заданный промежуток времени определенный объем информации); способность реагировать на управляющие воздействия (чувствительность) и другим.

АИК должен отвечать задачам эксперимента в части числа каналов нагружения и измерения, точности задания нагрузок и регистрации параметров, возможности использования различных типов источников внешнего воздействия и измерительных преобразователей. Особое значение имеют возможности АИК при проведении анализа результатов, их отображения, документирования и хранения.

Важной характеристикой АИК является его способность к структурной перестройке, расширению спектра решаемых задач, модернизации элементов вещественной и функциональной частей. На передний план проектирования и совершенствования АИК в последние годы выходит экономическая целесообразность принятия тех или иных решений.

Как указывалось выше, составляющей частью АИК - средством управления являются специализированные ЭВМ, так называемые управляющие вычислительные машины (УВМ) или комплексы (УВК), включающие в себя устройство связи с объектом, предназначенное: 1) для приема информации от измерительных устройств, местных (локальных) автоматизированных систем, устройств защиты и блокировки, а также других источников информации; 2) для переработки информации по программе, определяемой заданным алгоритмом управления в реальном масштабе времени; 3) для выдачи результатов обработки информации оператору, на исполнительные устройства и другие системы управления [94].

Управляющие ЭВМ быстро совершенствовались от ламповых машин первого поколения (начало 60 -х годов прошлого столетия) до мощных систем на больших интегральных схемах (БИС). Развитие УВМ открывает возможность наиболее полного удовлетворения предъявляемых к ним специфических требований: обеспечение одностороннего или двустороннего обмена информацией между объектом и управляющим устройством в процессе решения функциональных задач; решение задач управления, сбора и переработки информации в реальном масштабе времени; обеспечение продолжительности непрерывной работы в сотни часов; обеспечение высокой надежности и программной устойчивости к сбоям и отказам аппаратуры; возможность реализации широкого круга задач управления при относительной неизменности их в течение всего периода эксплуатации.

Для удовлетворения всех этих требований УВМ должна включать в свой состав: устройства сопряжения с внешними источниками информации; каналы связи и преобразователи информации; системы аппаратного контроля; оперативную и постоянную память достаточно большой емкости; счетчики реального времени; систему прерывания, обеспечивающую при появлении соответствующего сигнала от внешних и внутренних источников прекращение решения одной задачи и переход к решению другой с запоминанием результатов прерванной задачи.

Структуры и программно-технические средства УВМ зависят от режимов ее использования: информационного и режима управления.

Схема организации информационного режима, операции, выполняемые машиной, их последовательность представлены на рис. 4.23.

Этот режим характерен не столько для управляющих вычислительных машин, сколько для систем автоматического контроля, сбора и переработки информации, например, ИИС К742/1 Эти системы непосредственно не решают задач управления (управляющее слово формируется отдельной ЭВМ), но на основании собранной информации могут приниматься те или иные решения об управлении процессом испытания или объектом.

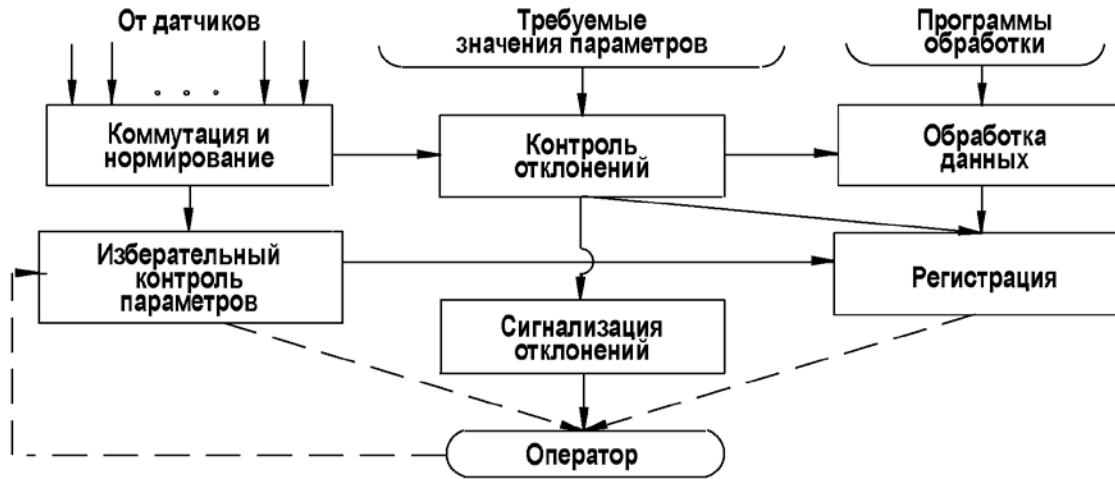


Рис. 4.23. Схема организации информационного режима

Схема организации режима управления показана на рис. 5.24.

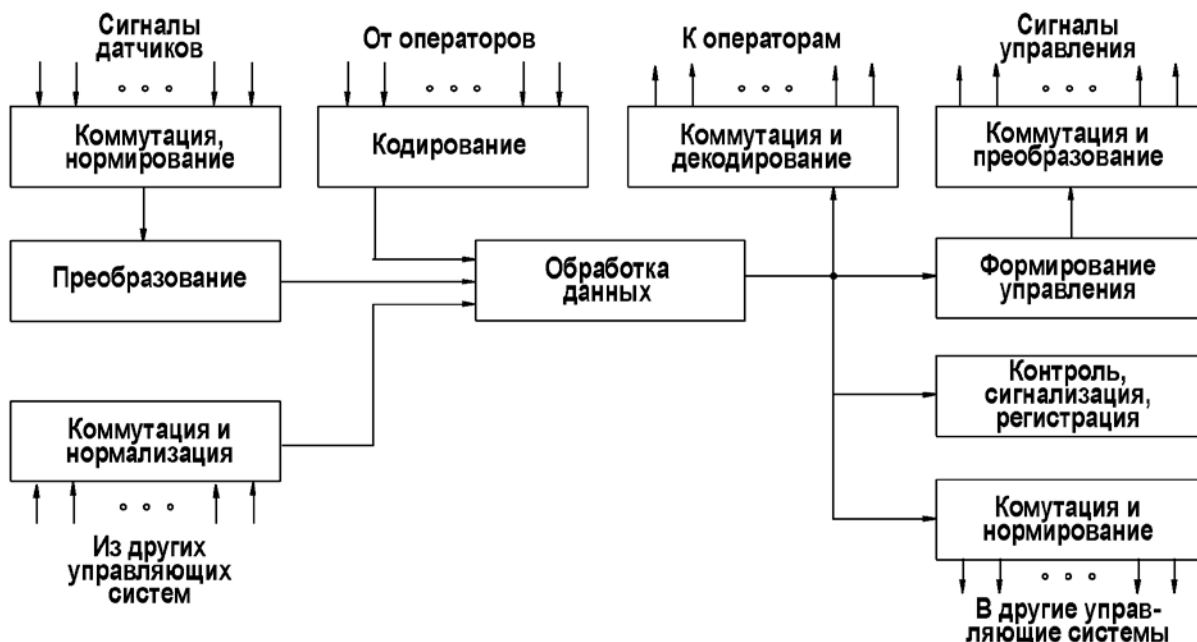


Рис. 4.24. Схема организации режима управления

Характерными особенностями этого режима являются: 1) наличие двухсторонней связи с объектом; 2) сосредоточение обработки информации в одном устройстве; 3) возможность решения сложных задач обработки управляющей информации.

На рис. 4.25 представлена структурная схема типовой УВМ, реализующей режим управления.

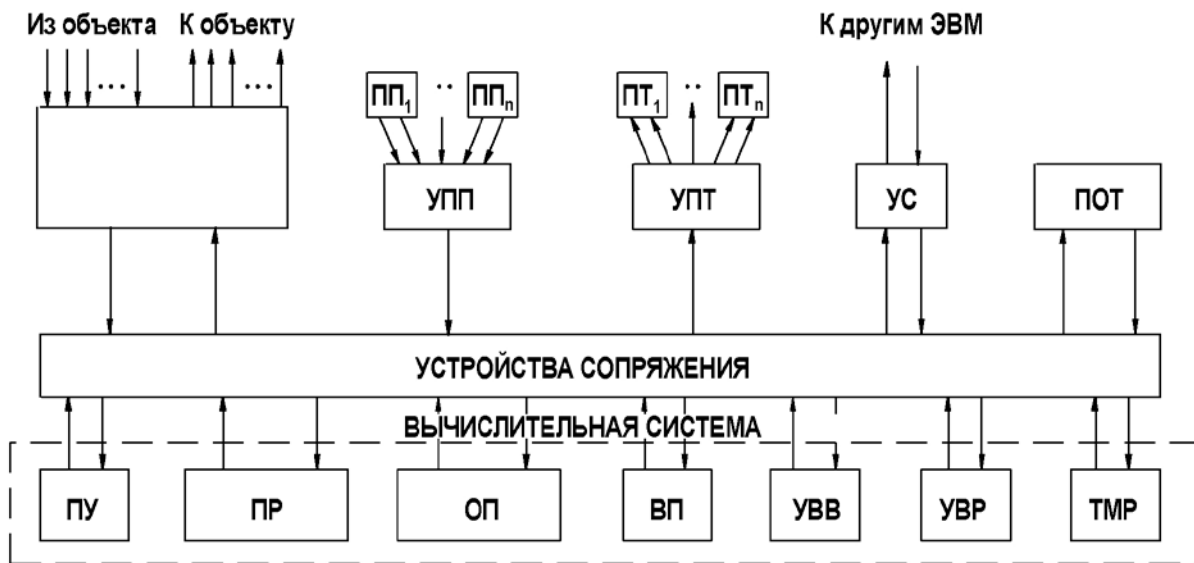


Рис. 4.25. Схема УВМ, реализующей режим управления

На рис. 4.25 приняты следующие сокращения: УСО - устройство связи с объектом; ПП₁...ПП_n - периферийные пульта; ПТ₁...ПТ_n - периферийные табло индикации; УПП и УПТ - устройства управления периферийными пультами и табло соответственно; ПР - процессор; ПОТ - пульт оператора-технолога; ПУ - пульт управления УВМ; ОП - оперативная память; ВП - внешняя память; УВР - устройства вывода и регистрации; УС - устройства связи с другими машинами; ТМР - таймер; УВВ - устройство ввода-вывода.

Из рис. 4.25 видно, что УВМ включает в свой состав основные блоки универсальных ЭВМ, которые формально можно объединить в вычислительную систему (ВС). Эта ВС через устройства сопряжения (аппаратурный интерфейс^{*)} и УСО связана с объектом (объектным модулем). Характерной особенностью структуры УВМ является наличие УСО, пультов ПП₁...ПП_n, ПТ₁...ПТ_n, ПОТ. Также обязательным для УВМ является наличие таймера (в составе или вне состава ВС), реализующего обработку информации в реальном масштабе времени.

Логическая структура устройства связи с объектом, обеспечивающего ввод аналоговой и дискретной информации с объекта управления, показана на рис. 4.26 и рис. 4.27.

^{*)}Интерфейс - логическая связь между взаимодействующими частями УВМ - выполняется либо с помощью специальных схем сопряжения, либо с использованием мультиплексных (работающих в режиме разделения времени) и селекторных каналов ввода - вывода информации.

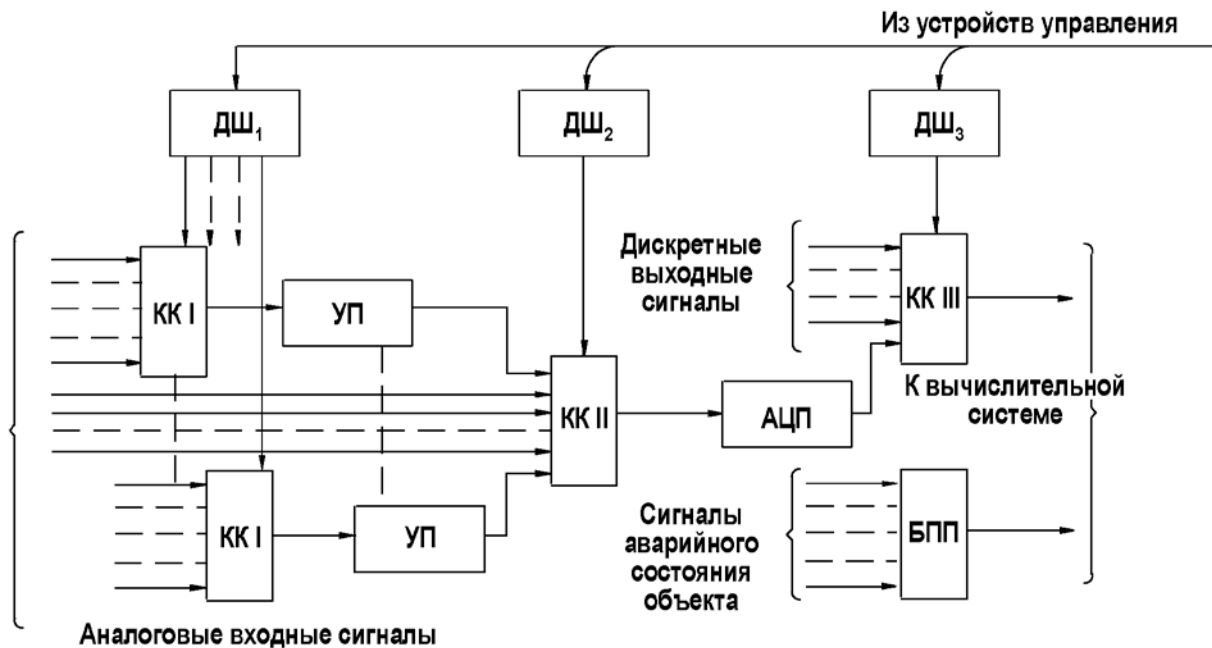


Рис. 4.26. Схема УСО для ввода аналоговой и дискретной информации

Входная аналоговая информация (см. рис. 4.26) от различных датчиков поступает на коммутаторы каналов ККИ и ККII. На входы коммутатора ККИ поступает информация с выходов датчиков, сигналы которых требуют согласования с входом и параметрами аналого-цифрового преобразователя АЦП. Это согласование, а также необходимая фильтрация выполняются специальными усилителями-преобразователями УП. После нормирования (приведения к единой размерной базе) входные сигналы с УП направляются на групповой коммутатор ККII. На вход этого же коммутатора поступают сигналы, параметры которых не требуют согласования с параметрами АЦП.

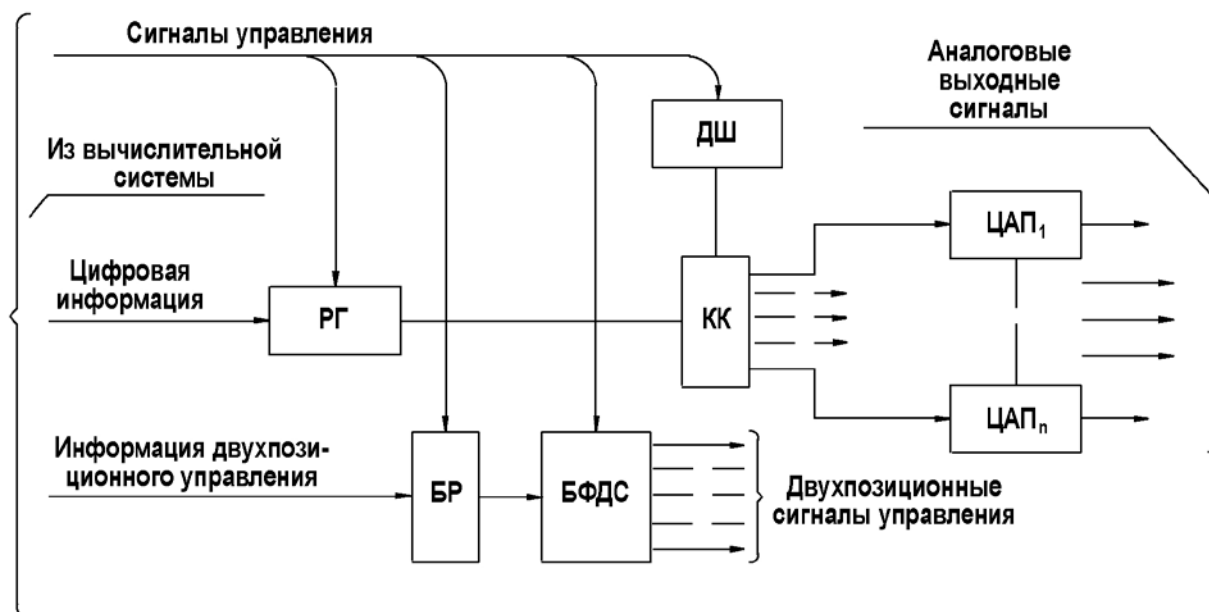


Рис. 4.27. Схема УСО для вывода аналоговой и дискретной информации

Выбор канала для ввода информации в АЦП осуществляется с помощью дешифраторов ДШ₁ и ДШ₂ по сигналам из устройства управления машины. Сигналы от цифровых и дискретных датчиков поступают в машину через коммутатор ККШ. Сигналы дискретных датчиков, имеющие двоичный характер (0 или 1), формируются в специальные «слова» и в таком виде поступают в вычислительную часть машины. Сигналы аварийного состояния объекта включаются на вход блока прерывания программ БПП. При их поступлении вырабатывается сигнал остановки машины.

Характерная особенность выходной части УСО (см. рис. 4.27) - использование цифро-аналоговых преобразователей ЦАП_i в каждом *i*-том канале формирования аналоговых сигналов. При этом ЦАП_i *)обеспечивают не только преобразование вводимой в них информации, но и ее запоминание в период времени между двумя циклами преобразования.

Выбор канала преобразования осуществляется по команде из устройства управления машины с помощью дешифратора ДШ и коммутатора каналов КК. Значения цифровой информации формируются, запоминаются и передаются по сигналам управления в коммутатор каналов КК регистром РГ. Для формирования сигналов двухпозиционного регулирования (дискретных сигналов управления) используется буферный регистр БР и блок формирования дискретных сигналов БФДС. Управляющее устройство координирует работу блоков УСО, получая соответствующие сигналы из вычислительной части машины.

Пульт оператора-технолога является составной частью рассмотренного в разделе 4.3 пульта управления испытаниями. Он формируется в зависимости от вида технологического процесса (в частности, статических испытаний) и предназначен для выполнения оператором коррекции его хода. Дистанционный контроль за испытаниями и управление ими может осуществляться также периферийными пультами и периферийными табло.

УВМ реализуют, как правило, однопрограммный и многопрограммный (мультипрограммный) режим работы. Последний называется режимом разделения времени. Он используется для рациональной организации вычислительного процесса и повышения эффективности использования машины.

Возможности УВМ определяются не только совершенством ее технического исполнения, но и качеством математического обеспечения (МО). МО разделяется по терминологии, принятой в [48], на функциональное (специальное) и общее.

Функциональное математическое обеспечение составляют алгоритмы и программы, реализующие задачи сбора и обработки информации, формирования управляющих воздействий и решение задач оптимизации в конкретной системе управления **).

Общее математическое обеспечение составляет алгоритмы и программы, описания и инструкции, предназначенные для автоматизации трудоемких этапов разработки программ, организации и контроля вычислительного процесса при реализации функциональных алгоритмов системы управления. Общее МО содержит две части: систему МО подготовки программ и систему МО вычислительного процесса. Первое включает в себя системы автоматизации программирования и отладки программ. Второе предназначено для автоматизации

*) В ряде случаев АЦП и ЦАП рассматриваются в структуре УВМ не в составе УСО, а отдельной самостоятельной позицией.

**) Формально, следуя [48], функциональное МО можно отнести к специализированному математическому обеспечению (СМО), выполняющему, в частности, следующие функции: опрос датчиков по заданному каналу АЦП в момент обращения; определение максимумов и минимумов сигнала, начиная с заданного момента времени, и исключение промежуточных максимумов и минимумов, вызванных помехами; определение интервала времени между событиями; выдача командного сигнала, например, делов по нагрузке.

процесса работы УВК в различных режимах. Основу его составляет оперативная система (ОС) - комплекс алгоритмов, служебных программ и аппаратных средств, предназначенных для управления процессом решения задач на машине без вмешательства оператора.

ОС современных как универсальных, так и управляющих ЭВМ - машинно-ориентированные системы, то есть, каждый тип машины имеет свою ОС, например, мини-ЭВМ типа СМ 4, СМ1420 имеют операционные системы ФОБОС, ДОС-СМ, ОСРВ; микро-ЭВМ «Электроника 60» - ОСДВК, мини-ЭВМ типа РДР-11 - ОСР1-11, мини-ЭВМ фирмы General Automation - ОС FMR. Однако, в последнее время для универсальных ЭВМ наметилась тенденция использования так называемых мультиплатформенных ОС, таких как UNIX и LINUX. Эти системы позволяют использовать написанные для них прикладные программы на различных типах ЭВМ. Функции системного математического обеспечения программируются на языках низкого и близкого к нему уровне, таких как различные АС-СЕМБЛЕРы и ANSI C. При работе с языками высокого уровня, такими как ФОРТРАН, VISUAL C, VISUAL BASIC и т.п. эти функции включаются в программы в виде системных вызовов.

Необходимо отметить, что помимо функционального и системного (общего) математического обеспечения УВМ использует и прикладное МО. Примерами таких программ могут служить программы отработки диаграмм деформирования образцов, программы нагружения при усталостных испытаниях, программы испытания материалов на ползучесть и т.п.

Рассмотрим далее некоторые комплексы, используемые при прочностных испытаниях аэрокосмических конструкций. В частности, широко известны следующие АИК: ГИДРОПУЛЬС фирмы SCHENCK (Германия); ИВК-2,-5, ПРОГНОЗ-1 (ЦНИИМАШ); ПРОЧНОСТЬ-2,-3,-7, L (ЦАГИ); НАДЕЖНОСТЬ-1 (ХАИ) и др.

Основной системой большинства этих комплексов является автоматизированная система нагружения (АСУН). На рис. 4.28 представлена блок-схема многоканальной АСУН ПРОЧНОСТЬ-3 разработки Киевского ПКБ АСУ.

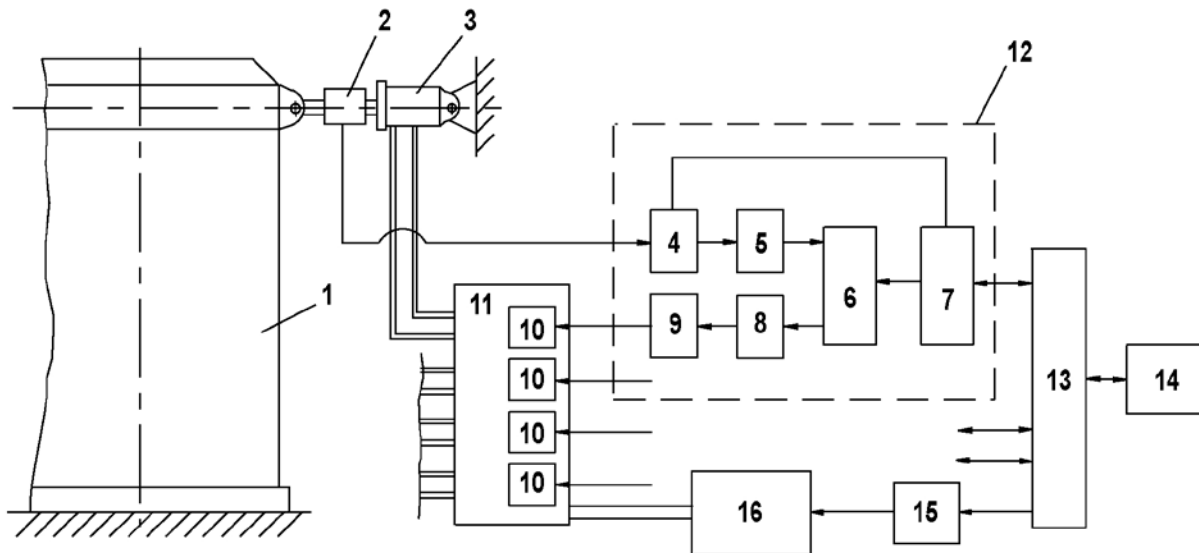


Рис. 4.28. Блок-схема многоканальной АСУН ПРОЧНОСТЬ-3:

1 – объект испытаний; 2 – тензодинамометр; 3 – сило-возбудитель; 4 – нормирующий усилитель-преобразователь; 5 – АЦП; 6 – УСО; 7 – процессор; 8 – ЦАП; 9 – аналоговый усилитель; 10 – агрегат управления типа АУ-38Б; 11 – пульт редуцирования давления; 12 – блок программного регулирования ЛИУС-2; 13 – интерфейс; 14 – мини-ЭВМ; 15 – контроллер аварийного отключения МНС; 16 – МНС

АСУН ПРОЧНОСТЬ-3 является представителем двухуровневых многоканальных систем со следящим регулированием и жесткой обратной связью. Сигнал управления по каждому каналу на нижнем уровне формируется собственным процессором. Задание программы нагружения объекта в целом, контрольные функции работы системы, вторичная обработка результатов измерения нагрузок, аварийное отключение МНС осуществляется ЭВМ верхнего уровня^{*)}. В качестве последней использовались ЭВМ типа СМ 1420 с интерфейсом стандарта КАМАК, либо, как указано на блок схеме, мини-ЭВМ с процессором серии Pentium II со специальной интерфейсной платой.

Если ЛИУС-2 представляет собой простейший одноканальный контроллер, то современные АИК, АСУТП базируются на программируемых логических контроллерах ПЛК, некоторые типы которых были упомянуты в главе 3. Отметим дополнительно, что фирмой BOSCH (Германия) разработана технология гибкой автоматизации на основе серии ПЛК типов: GL 100, PC 400, GL 300, GL 500, PC 600. Эти ПЛК оснащены системой программаторов (PG 100, PG 4, PG 5, ВО-Т3200), обеспечивающей создание АСУ заданной конфигурации, заданного круга задач, так называемых «интеллектуальных» многообразно расширяемых систем для диагностики, аналоговой обработки, регистрации быстрых импульсов, позиционирования, коммуникации и хранения текста. ПЛК PC 600, например, имеет 2048 входов, 2048 выходов, 4056 маркеров, 256 таймеров, 256 счетчиков. Время обращения: 4 мс/к. Средством быстрого подключения ПЛК к ЭВМ серии IBM-PC/AT является коммуникационная система DESI, надежно защищенная от помех.

На блок схеме рис. 4.29 показан АИК СИГМА-М, эксплуатируемый в лаборатории статических испытаний ЦСКБ. Он, по существу, является типовым автоматизированным испытательным комплексом, объединяющим АСУН, одну или несколько ИИС (К 742/1, ЛИК-750, ЛИК-2000) различной «мощности», т.е. выполняющих измерения и первичную обработку в различном объеме, также автоматизированную расчетную систему (АРС); как правило, используются расчетные системы на основе метода конечных элементов, например: LS-DYNA, NASTRAN, ADAMS, ANSYS, СПРУТ, MAPC, ЭНЕРГИЯ. Все элементы АИК на верхнем уровне управляются ЭВМ, сопряженной с ними интерфейсом.

^{*)} Кроме систем управления нагружением со следящим регулированием известны системы с позиционным регулированием, которые ведут управление не по силе, а по давлению в группе силовозбудителей. Известны системы регулирования по заданному деформированному состоянию.

Наряду с традиционными аналоговыми системами автоматического управления в последние годы стали широко внедряться так называемые адаптивные системы, в которых в линию обратной связи вводится контур адаптации, позволяющий оптимизировать ошибки регулирования.

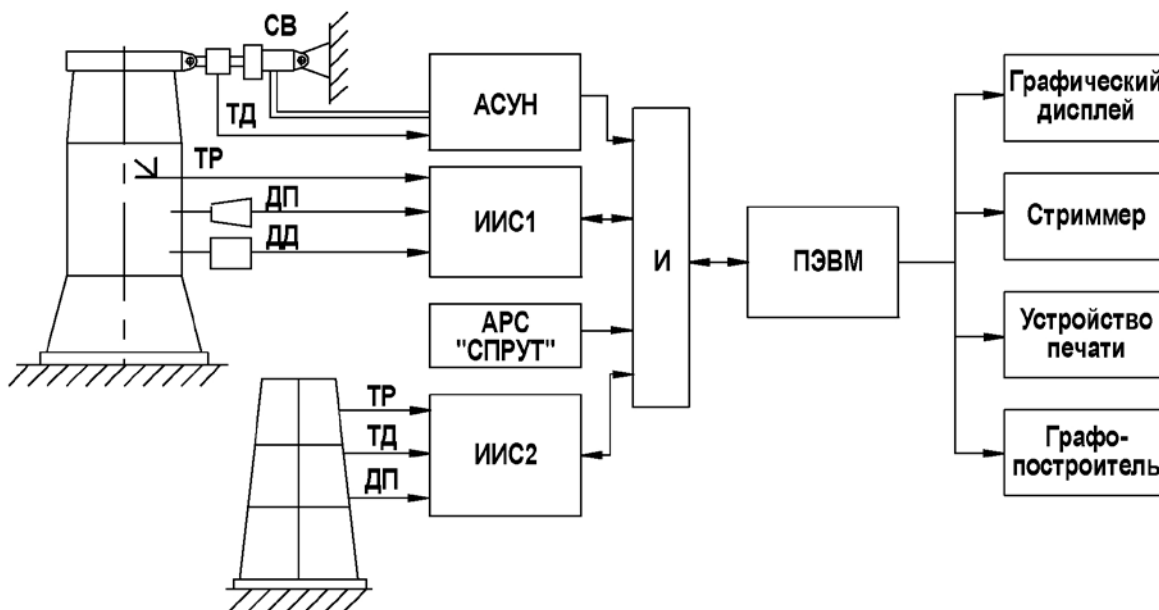


Рис. 4.29. Блок схема АИК СИГМА-М

Характерной особенностью АИК СИГМА-М является МО подготовки эксперимента. Оно позволяет вводить в память ЭВМ в графическом виде схему развертки изделия в сборе и развертки конструктивных элементов объекта испытаний с указанными на них тензорезисторами по зонам. Узлы тензометрирования координируются в полном соответствии с узлами в конечно-элементной модели конструкции, исходные данные которой формируются в АРС СПРУТ.

Схемы размещения ТР, оформленные в соответствии с ЕСКД, выводятся на печать, пример одной из схем приведен на рис. 4.30. После построения на графическом дисплее указанных схем в памяти ЭВМ автоматически формируется матрица координат ТР, которая потом дополняется коэффициентами тензочувствительности ТР, данными кроссировки кабельной сети, механическими свойствами материала испытуемого изделия в каждой зоне расположения тензорезисторов. Наличие базы исходных данных, построенной таким образом, позволяет в ходе эксперимента оперативно определять наиболее опасные зоны конструкции, а после его окончания вести корректное сопоставление экспериментальной и расчетной моделей конструкции и проводить уточнение последней.

Кроме того, графическое отображение НДС объекта испытаний, построение зависимостей $\sigma_i - F$, $\varepsilon_i - F$, $F / \varepsilon_i - F$ для любого i -го тензорезистора или розетки позволяет ускорить анализ результатов испытаний и принятие решений об их дальнейшем продолжении. В качестве примера на рис. 4.31 представлена форма выдачи АИК СИГМА-М графиков зависимостей $\sigma_i - F$.



Рис.4.30. Форма выдачи АИК СИГМА-М
схем размещения тензорезисторов

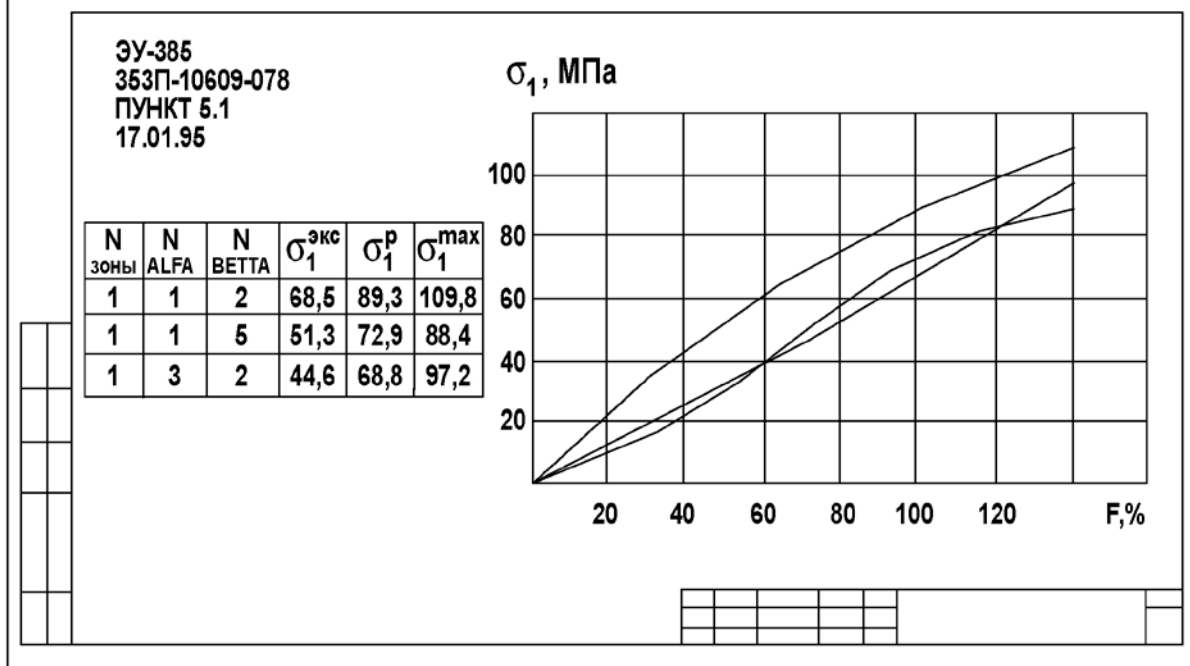


Рис. 4.31. Форма выдачи АИК СИГМА-М зависимостей $\sigma_i - F$

ГЛАВА 5. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

ГЛАВА 5. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

5.1. Обзор методов

Учитывая актуальность внедрения в ракетной технике неразрушающих методов прочностных, в особенности статических испытаний, в связи с растущими требованиями к повторному использованию дорогостоящих экспериментальных установок и безаварийному проведению экспериментов, а также принимая во внимание ограниченность публикаций, посвященных этому вопросу, кратко обобщим некоторые сведения о методах проведения неразрушающих статических испытаний (НСИ), прогноза прочности и устойчивости конструкций КА в отдельном разделе настоящей работы.

Прежде всего, отметим высокую практическую значимость прогноза прочности конструкции и прогноза ее устойчивости или исчерпания несущей способности ^{*)}. Прогноз устойчивости необходим для подкрепленных оболочек и пластин, наиболее часто применяемых в аэрокосмической технике. Разрушение за счет потери устойчивости наиболее опасно, поскольку оно происходит лавинообразно, причем при значениях сжимающих критических напряжений, значительно уступающих пределам текучести или прочности материала. Прогноз прочности необходим для ферменных, толстостенных элементов конструкций, узлов вращения и ряда других деталей. Он достаточно широко внедрен. Основным методом прогноза прочности является вычисление коэффициентов запаса прочности в различных ее точках на заданный уровень нагрузки. Эта задача решается экстраполяцией зависимостей действующих в i -тых точках напряжений σ_i , косвенно замеренных отдельными тензорезисторами или розетками, от нагрузки и сравнением полученных величин с предельными. В простейшем случае в качестве предельных могут быть взяты напряжения, характеризующие свойства материала, например σ_m , σ_g или специально разрабатываемые критерии прочности [30].

Особое место в разработке практических методов прогноза прочности принадлежит ЦНИИМаш, внедрившему при испытаниях широкого класса КА систему «Прогноз» (авторы Тренин С.И., Твердый Ю.В., Смирнов Н.Г., Климонов О.П., Грибанов В.Ф., Антоненко Н.Д. и др. [27,96].

Первая попытка прогноза устойчивости, т.е. определения критической нагрузки стержня без его разрушения, была сделана В.Аэртоном и Д.Перри еще в 1886 году [122]. Исследования в этой области проводились в различных направлениях и привели к созданию весьма отличающихся друг от друга методов, среди которых: динамические, жесткостные, энергетические, зондирующей силы, F/S- метод, комбинированные.

Динамические методы основаны на исследованиях колебаний системы [132]. При сжатии вертикальной стойки, как в начале века отметил А.Зоммерфельд [149], ее собственная частота уменьшается по мере увеличения сжимающей осевой силы и приближается к нулю к моменту потери устойчивости. Х. Лурье [141] показал, что для шарнирно опертого стержня квадрат собственной частоты и осевая сила связаны линейной зависимостью, если форма потери устойчивости совпадает с формой колебаний. Динамические методы используются при исследованиях оболочек. А.Розеном и Д.Зингером [147], применительно

^{*)} Понятие «исчерпание несущей способности» иногда используется в случае разрушения конструкции из-за превышения действующих растягивающих напряжений уровня предела текучести или прочности.

к подкрепленным цилиндрическим оболочкам был разработан так называемый метод корреляции колебаний. В этом методе замеряются собственные частоты нагруженной оболочки, затем уточняются истинные условия закрепления оболочки, после чего теоретически рассчитывается прогнозируемая критическая нагрузка системы. Известен и динамический метод прогнозирования разрушения твердых тел [11], базирующийся на автоколебательной концепции. Результаты испытаний реальных конструкций динамическими методами представлены в работах [121,124,127] и других.

Недостатком динамических методов является необходимость использования дорогостоящего испытательного оборудования, а также средств регистрации изменений частоты собственных колебаний конструкции.

Жесткостные методы при относительной простоте измерительных средств дают наилучшие результаты. Эти методы опираются на оперативный анализ эффективной жесткости конструкции в ходе ее нагружения. Наиболее известным из них является метод Р.Саусвелла [90,150].

Более полувека назад Саусвелл рассматривал процесс выпучивания предварительно изогнутого стержня, поведение которого описывает, в отличие от Эйлеровского идеального стержня, уравнение неоднородной краевой задачи. Анализируя явное решение краевой задачи в форме тригонометрического разложения, Р.Саусвелл подметил, что первый член разложения прогиба в центре стержня $\delta(F)$, представляющий собой при $F = F_{кр}$ преобладающую часть этого прогиба, изображается в ходе выпучивания на плоскости $\delta, \delta / F$ прямой линией, котангенс угла наклона которой равен $F_{кр}$.

По оценке С.П.Тимошенко [97], Р.Саусвелл предложил «...очень полезный метод определения критической нагрузки по данным опытов, относящийся к упругой области ...». Однако метод получил широкое распространение только при активном использовании для обработки данных эксперимента ЭВМ. Как пример его успешного применения можно привести работу [148], посвященную неразрушающим исследованиям орбитальной станции «Скайлэб».

В работах [71,72] Г.Г.Онановым было доказано, что рассуждения Р.Саусвелла «...дословно переносятся на неоднородные линеаризованные уравнения линейно упругих стержней и пластин (гладких и подкрепленных) при разнообразных способах нагружения и закрепления, для которых решение представимо в виде разложения по ортогональным собственным функциям». Более того, замеченное Р.Саусвеллом свойство одного единственного процесса «не изолированная особенность, а проявление объективно существующей закономерности протекания многих нелинейных процессов». В работе [72] проанализировано большое количество экспериментальных данных, полученных различными авторами, построен ряд графиков Р.Саусвелла и сделан вывод о его высокой точности. Однако следует отметить, что Г.Г.Онановым рассматривались простейшие конструктивные элементы типа стержней и пластин, сжимаемых вдоль продольной оси.

Возможность обобщения метода Р.Саусвелла на случай пластин отмечена С.П.Тимошенко [97]. Пластины с эллиптическим отверстием также изучались П.Даттой и Р.Карлсоном [127], для двусосно сжатых пластин метод Р.Саусвелла был применен И.В.Рудасом [80]. Удовлетворительные результаты прогноза устойчивости цилиндрических оболочек получены Л.Доннелом [128]. Многочисленные исследования различных авторов выявили ряд недостатков метода Р.Саусвелла. Например, в работе М.Катухико и И.Такуя [143] указано, что в этом методе необходимо прикладывать нагрузку достаточно близкую к критической для получения данных с необходимой надежностью. В связи с этим метод нельзя в полной мере относить к области неразрушающих методов прочностных испытаний.

Развитие метода Р.Саусвелла велось в самых различных направлениях. Н.А. Алфутовым [6], например, замечено, что удобнее зависимость Р.Саусвелла рассматривать в координатах F / δ , F , (а не δ , δ / F). Тогда $F_{кр}$ находится непосредственно экстраполяцией прямой Саусвелла до оси нагрузок.

С целью сокращения числа измерений в ходе неразрушающих испытаний Д.Форд [131] предложил для цилиндрических оболочек брать во внимание лишь точки вдоль окружности среднего сечения. Перемещения в этих точках обрабатываются с помощью гармонического анализа и по отдельным гармоникам строятся графики Саусвелла.

В работах Н.А.Алфутова, А.А.Рубцова [7,79] и А.С.Вольмира [17] выдвинута концепция «резонансных» гармоник, базирующаяся на том, что на потерю устойчивости конструкций превалирующе влияют резонансные начальные прогибы, даже если в исходном состоянии по амплитудной величине они были меньше, чем другие. Эта концепция подтверждена положительными результатами неразрушающего определения критической нагрузки тонкостенной цилиндрической оболочки, нагруженной гидростатическим давлением [79].

Энергетический метод прогноза устойчивости описан в работе И.Финанце [129], где представлен подход Лундквиста, в котором предсказывание критической нагрузки предлагается осуществлять по результатам экспериментального определения упругой энергии, накопленной в конструкции. Для этого измеряются прогиб и нагрузка в заведомо устойчивом состоянии и далее в ходе нагружения регистрируются величины приложенных нагрузок и смещений точек их приложения. Далее делается поправка на часть энергии, запасаемой в нагружающем устройстве. Момент приближения к критической нагрузке определяется по отклонению зависимостей «упругая энергия - параметр нагружения» от прямолинейной. Отмечается, что предложенный метод не чувствителен к потере устойчивости недостаточно массивных элементов сложной конструкции.

Метод зондирующей силы (метод поперечной жесткости) [123,130,134,135] основан на искусственном увеличении начальных несовершенств конструкции путем приложения в заданной точке поперечного зондирующего усилия Q малой величины. Отношение Q / v_i (v_i - дополнительный прогиб в этой точке при нагружении основной силой F) и нагрузка F связаны между собой линейной зависимостью, причем соответствующая прямая пересекает ось F в точке $F_{кр}$. Применительно к простым конструктивным элементам метод зондирующей силы дает удовлетворительные результаты, причем В.Хортон, Е.Нассар и Н.Сингхел показали [136], что при использовании этого метода в случае цилиндрических оболочек нет необходимости прикладывать осевые нагрузки, превышающие 1/3 от критического значения. Авторы работы [136] выбирали величину боковой нагрузки в исследуемой точке такой, что она вызывала начальное отклонение оболочки, не превышающее ее толщину.

К существенному недостатку метода зондирующей силы относится необходимость доступа к конструкции в ходе испытаний. Метод требует создания зондирующих усилий с одновременным замером соответствующих перемещений. Описанные в литературе сканирующие устройства, необходимые для этого [134,135], сложны и требуют при испытаниях дополнительной оснастки.

F/S - метод. Развитие тензометрических средств измерений привело к созданию модификации метода Саусвелла, предложенной в работе [139] Р.Джонсом и Б.Грином и названной авторами *F/S* - методом. Этот метод, относящийся к группе жесткостных, использующий замер не перемещений, а деформаций S , основан на широком применении тензометрии с последующей обработкой данных на ЭВМ. Зависимость F/S от F для продольно-

го изгиба так же, как график Саусвелла в координатах $F / \delta, F$ имеет вид ниспадающей линии, пересекающей ось F в точке критического значения $F_{кр}$. Отношение F/S при надлежащем выборе S может служить характеристикой эффективной жесткости конструкции. Авторы рядом экспериментов на панелях, подверженных одновременному действию сжатия, изгиба и сдвига показали, что F/S - метод открывает возможность параллельного исследования местной и общей потери устойчивости сложных систем, что практически недоступно методу Саусвелла.

Использованию F/S - метода для прогноза критических нагрузок сложных конструкций подтверждены в работах И.Финанце [129], К.Фостера [132]. Положительные результаты применения F/S - метода при испытаниях на продольный и поперечный изгиб вафельных стрингерных панелей, подкрепленных пластин и цилиндрических оболочек получены в ЦНИИМаш, ЦСКБ [53,99.101] и других организациях.

F/S - метод, использующий большой объем тензометрической информации и нуждающийся в эффективных схемах размещения тензорезисторов, требует разработки специального математического обеспечения. В исследовательских центрах США названное МО существует уже достаточно давно, примером тому может служить опубликованная еще в 1972 году работа [133], посвященная реализации с помощью ЭВМ F/S - метода применительно к цилиндрическим оболочкам. Одна из модификаций F/S - метода легла в основу автоматизированной системы неразрушающего прочностного эксперимента «Прогноз-К», внедренной в ЦСКБ [103].

Продолжая тему математического обеспечения неразрушающих испытаний, необходимо обратить внимание на стремление исследователей повысить достоверность прогноза несущей способности за счет внедрения априорной статистики дефектов, создания и последующего анализа многодефектных моделей [146].

Комбинированные методы. В последние годы появились работы по повышению достоверности и надежности прогноза путем комбинирования различных методов, например, жесткостного и динамического; жесткостного и ультразвукового. В комбинациях с жесткостными методами могут применяться принципиально новые методы регистрации и анализа деформаций и перемещений или регистрации критического состояния конструкции по энергетическим критериям такие как, например, метод сетки из оптических волокон и метод одиночного волокна, метод голографического муара или когерентной оптики [44,50], метод рентгеновской тензометрии [15], ультразвуковой метод [98].

Современные требования к конструкциям летательных аппаратов приводят к активному использованию композитных материалов (КМ). Экспериментальным исследованиям конструкций из КМ посвящено большое количество работ [37,49]. Однако, то время, когда методы неразрушающего контроля качества композиционных материалов достаточно хорошо разработаны [23,32,37,49], круг публикаций по методам прогнозирования прочности и устойчивости сложных конструкций их КМ весьма ограничен [53]. Создание последних методов является особо актуальной задачей.

Применимость тех или иных из вышеприведенных методов НСИ определяется сложностью конструкции, используемым испытательным оборудованием, а также постановкой задачи: управление текущим экспериментом или однозначное сохранение конструкции для ее дальнейшего повторного использования.

Учитывая тот факт, что наилучшие результаты прогнозирования критических нагрузок дают методы, основанные на анализе изменения эффективной жесткости конструкции в ходе ее нагружения, в следующем разделе коротко изложим теоретические основы именно этих методов.

5.2. Теоретические основы жесткостных методов НСИ

Следуя Р.Саусвеллу [90,150], дифференциальное уравнение изогнутой оси шарнирно опертого стержня длиной l , сжатого осевой силой F и имеющего в исходном состоянии начальный прогиб $v(x)$, запишем в виде:

$$EI \frac{dv_1^2}{dx^2} + Fv = 0, \quad (5.1)$$

где EI - жесткость при изгибе,

v_1 - дополнительный прогиб от действия силы F ,

$v = v_0 + v_1$ - полный прогиб.

Умножив уравнение (5.1) на $\sin \frac{n\pi x}{l}$ и проинтегрировав его в пределах от 0 до l по частям, и, учитывая, что $v_1 = v_0$ при $x = 0, x = l$, получим

$$\int_0^l [F_n v_0 - (F_n - F)v] \sin \frac{n\pi x}{l} dx = 0, \quad (5.2)$$

где $F_n = \frac{n\pi EI}{l}$, ($n = 1, 2, 3, \dots$) - Эйлера нагрузка.

Представляя далее v_0 и v в виде разложений

$$\begin{aligned} v_0 &= C_1^0 \sin \frac{\pi x}{l} + C_2^0 \sin \frac{2\pi x}{l} + \dots + C_n^0 \sin \frac{n\pi x}{l}, \\ v &= C_1 \sin \frac{\pi x}{l} + C_2 \sin \frac{2\pi x}{l} + \dots + C_n \sin \frac{n\pi x}{l}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

и, внося (5.3) в (5.2), с учетом свойства ортогональности тригонометрических функций, получим соотношение

$$\frac{C_n^0}{C_n} = 1 - \frac{F}{F_n}. \quad (5.4)$$

Равенство (5.4) связывают между собой коэффициенты рядов v и v_0 и, в совокупности с (5.3), дают общие решения уравнения (5.1).

Пусть $\delta_0 = v_0 \left(\frac{l}{2} \right)$ - начальный, а $\delta = v \left(\frac{l}{2} \right)$ - окончательный (полный) прогибы

в среднем сечении стержня. Из (5.3) имеем:

$$\begin{aligned} \delta_0 &= C_1^0 - C_3^0 + C_5^0 - \dots \\ \delta &= C_1 - C_3 + C_5 - \dots \end{aligned} \quad (5.5)$$

Согласно (5.4)

$$C_1 = \frac{C_1^0}{1 - \frac{F}{F_1}}, C_3 = \frac{C_3^0}{1 - \frac{F}{F_3}}, \dots \quad (5.6)$$

значения F_n для $n \neq 1$ превосходят F в n^2 раз. Поэтому при $F \leq F_1$ коэффициенты C_3, C_5, \dots малы по сравнению с C_1 , так что можно принять

$$\delta \approx C_1 = \frac{C_1^0}{1 - \frac{F}{F_1}}. \quad (5.7)$$

Величина F_1 является наименьшим значением эйлеровой критической силы, для которой в дальнейшем будем использовать общепринятое обозначение $F_{кр}$. Положив

$$\delta_1 = \delta - \delta_0, \quad (5.8)$$

из (5.5) и (5.6) с учетом сказанного будем иметь

$$\delta_1 \approx \frac{C_1^0}{\frac{F_{кр}}{F} - 1}. \quad (5.9)$$

Отсюда получаем

$$(F_{кр} - F)\delta_1 = C_1^0 F. \quad (5.10)$$

Величину δ_1 , характеризующую дополнительный прогиб в середине стержня, можно измерить экспериментально. В осях F, δ_1 равенство (5.10) определяет равнобокую гиперболу с асимптотами

$$\begin{aligned} F - F_{кр} &= 0 \quad (\delta_1 \rightarrow \infty), \\ \delta_1 + C_1^0 &= 0 \quad (F \rightarrow \infty). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Построив по показаниям δ_1 и F экспериментальную кривую, и, проведя к ней асимптоты, по котангенсу угла их наклона к оси F можно найти критическую нагрузку $F_{кр}$. Отметим, что такой способ определения $F_{кр}$ не требует нагружения образца до потери устойчивости. Это и составляет суть широко известного метода Саусвелла. Чтобы понять, почему он называется жесткостным, достаточно рассмотреть наиболее распространенную его модификацию [6].

Поделив (5.10) на $\delta_1 C_1^0$, получим:

$$\frac{F}{\delta_1} = -\frac{F}{C_1^0} + \frac{F_{кр}}{C_1^0}. \quad (5.12)$$

Отсюда следует, что между $\frac{F}{\delta_1}$ и F существует линейная зависимость, пример которой представлен на рис. 5.1.

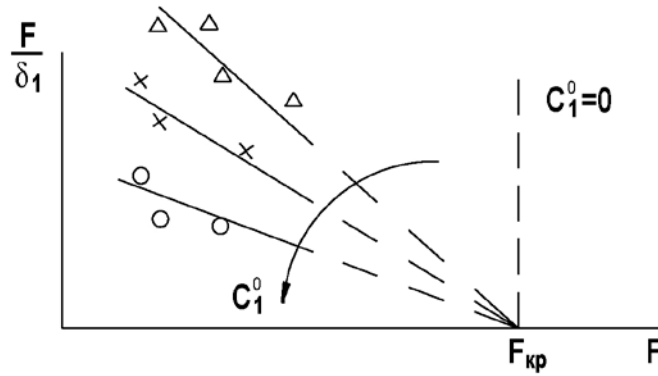


Рис. 5.1. Типовой вид модифицированных графиков Саусвелла для шарнирно-опертого стержня

Угол наклона саусвелловских прямых определяется величиной амплитуды начальных несовершенств C_1^0 . Если измерить при нескольких значениях F дополнительный прогиб в среднем сечении δ_1 , можно построить, как показано на рисунке 5.1, экспериментальную прямую. Пересечение ее с осью абсцисс дает $F_{кр}$. Отношение $\frac{F}{\delta_1}$ характеризует поперечную жесткость стержня.

Описанный метод может быть применен [6] к исследованиям устойчивости стержня, произвольно нагруженного в осевом направлении с произвольным условием закрепления. В этом случае уравнение (5.9) примет вид :

$$v_1(x) \approx \frac{C_1^0}{\frac{F_{кр}}{F} - 1} - v_{кр}(x), \quad (5.13)$$

где $v_{кр}(x)$ - первая собственная функция однородной задачи, описывающая форму изогнутой оси идеального стержня при потере устойчивости, $F_{кр}$ - параметр нагрузки, соответствующий этой форме потери устойчивости, F - параметр действующей нагрузки.

Приводя (5.13) к виду (5.12) получим

$$\frac{F}{v_1(x)} = \frac{F}{C_1^0 v_{кр}(x)} + \frac{F_{кр}}{C_1^0 v_{кр}(x)}. \quad (5.14)$$

При фиксированных значениях x получается линейная зависимость $\frac{F}{v_1}$ от F , полностью совпадающая с (5.12).

В работах [23,79,97] обоснована справедливость соотношения типа (5.7) для пластин и оболочек. Формально прием Саусвелла может быть применен к любой неоднородной линейной краевой задаче вида (5.1), если ее решение представимо разложением по собственным функциям соответствующей однородной задачи, доминирующий член которого имеет вид соотношения (5.13). Однако, во-первых, такое представление не очевидно даже

для многих задач теории упругой устойчивости, а во-вторых, реальные процессы адекватно описываются, как правило, нелинейными уравнениями.

Достаточная теоретическая обоснованность жесткостного метода прогноза устойчивости и прочности, к сожалению, не привела к широкому распространению подхода Саусвелла, прежде всего, из-за сложности замеров перемещений в реальных условиях. Важными факторами, препятствующими применению метода Саусвелла, являлись также: необходимость доступа к конструкции при ее нагружении, что противоречит технике безопасности, и значительный объем вычислений в ходе испытаний, связанный с экстраполяцией прямых Саусвелла и вторичной обработки данных.

Как указывалось выше, наиболее приспособленной к прогнозу критических нагрузок можно отнести интерпретацию метода Саусвелла, разработанную Р.Джоунсом и Б.Грином [139] и названную авторами F/S - методом, в котором за основу берутся не перемещения, а деформации. Представим ниже соотношения жесткостного F/S - метода прогноза устойчивости конструкций.

На классическом примере продольного изгиба шарнирно опертого стержня с начальным прогибом в срединном сечении, равным δ_0 , покажем, следуя работе [139], возможность использования соотношений Саусвелла типа (5.12) при замене замеров прогибов на замеры деформации в том же сечении.

Величина деформации изгиба в центре стержня выражается в виде:

$$\varepsilon_u = \kappa F(\delta + \delta_0), \quad (5.16)$$

где δ - текущий прогиб;

κ - коэффициент пропорциональности, зависящий от механических свойств материала и размеров поперечного сечения.

Общее смещение, исходя из зависимости (6.7), может быть выражено уравнением

$$\delta + \delta_0 = \frac{\delta_0}{1 - \frac{F}{F_{кр}}}. \quad (5.17)$$

Подставив его в предыдущее уравнение, получим:

$$\frac{F}{\varepsilon_u} = \frac{1 - \frac{F}{F_{кр}}}{\kappa \delta_0}. \quad (5.18)$$

Эта зависимость на плоскости $\frac{F}{\varepsilon_u}$, F - представляет собой прямую линию, пересе-

кающую ось F в точке $F_{кр}$, которая может служить основой для экспериментального определения критической нагрузки. Деформация изгиба ε_u может быть определена по разнице показаний тензорезисторов, попарно наклеенных на противоположных поверхностях стержня или пластины.

Однако, в практике испытаний сложных конструкций это зачастую бывает затруднительным. Суммарная деформация стержня, замеренная одиночным тензорезистором, выражается формулой, учитывающей сжатие:

$$\varepsilon = \kappa F(\delta_1 + \delta_0) + \frac{F\bar{N}_0}{AE}, \quad (5.19)$$

где A - площадь сечения стержня;

\bar{N}_0 - величина осевого усилия при $F = 1$ в том сечении, где наклеен тензорезистор;

E - модуль упругости.

Вместо (5.18) теперь будем иметь соотношение

$$\frac{F}{\varepsilon} = \frac{1 - \frac{F}{F_{кр}}}{\kappa\delta_0 + \bar{N}_0 \frac{F_{кр}}{AE}}, \quad (5.20)$$

которое представляет уже нелинейную зависимость $\frac{F}{\varepsilon}$ от F . Кривая зависимости (5.20)

по-прежнему пересекает ось F в точке $F_{кр}$, следовательно, в основу прогноза $F_{кр}$ можно положить замеры и полной деформации.

Обозначим буквой S любую величину, характеризующую локальную деформацию испытуемого объекта и определяемую в эксперименте на основании показаний одиночных тензорезисторов либо их розеток. Таким образом, F/S - метод заключается в экспериментальном построении зависимости F/S от F с последующей ее экстраполяцией до пересечения с осью F , что дает прогноз для $F_{кр}$.

Типичный F/S - график для идеального упругого стержня, построенный по показаниям одиночного тензорезистора, представлен на рис. 5.2.

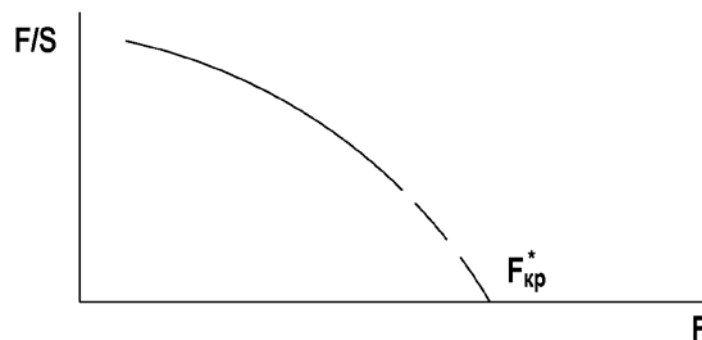


Рис. 5.2. Характер F/S -кривой для идеально упругого стержня

Для реальных конструкций F/S - графики отличаются большим разнообразием. Их вид зависит как от места установки тензорезистора, его направления, так и от характера деформирования. Рассмотрим (см. рис. 5.3) наиболее типичные F/S -кривые на примере испытаний подкрепленной шпангоутами и стрингерами конической оболочки с окантованными круглыми люками, подверженной воздействию внешнего равномерного давления.

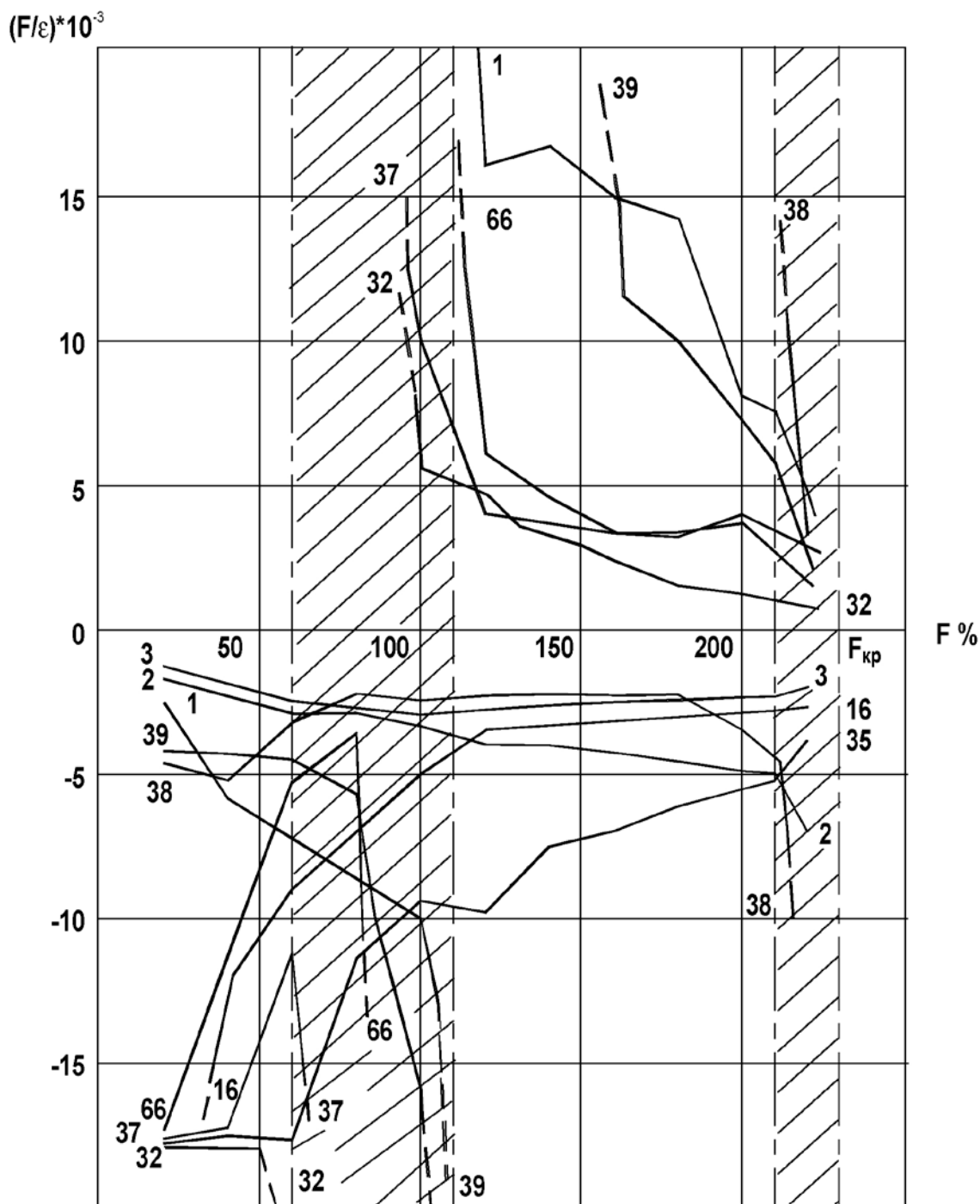


Рис. 5.3. Типовой вид F/S – кривых, полученных при испытаниях подкрепленной конической оболочки на внешнее давление

На рис. 5.3 представлены F/S - кривые по показаниям десяти из 127 тензорезисторов, использованных для проведения измерений. ТР № 1, 2, 3 расположены на полках шпангоутов в окружном направлении; № 32, 37, 39, 66 - в меридианальном, № 38, 16, 35 - в окружном направлениях на наружной поверхности оболочки. Действующая нагрузка F дана

в процентах от расчетной F_p . В ходе испытаний при $F = 60\% F_p$ визуально отмечено легкое нарастающее волнообразование, при $F = 110\% F_p$ произошел хлопок, не приведший к разрушению и существенным изменениям геометрии конструкции. При $F = 210\% F_p$ началась новая перестройка волнообразования, которая привела к разрушению оболочки при $F = 229\% F_p$.

Эти эволюции напряженно-деформированного состояния конструкции отмечены штриховкой и отражены видом F/S - кривых. Так, при появлении волн на оболочке ТР № 32, 37, 39, 66, установленные в зоне волнообразования, зафиксировали смену знака деформации. Экстраполяция F/S - кривых до оси F дает прогноз нагрузки так называемой местной потери устойчивости. Смена знака деформации, замеренной ТР № 1, расположенным на шпангоуте меньшего радиуса при $F = 110\% F_p$ дает основания предполагать, что хлопок при указанной нагрузке является подтверждением потери устойчивости одной из полок этого шпангоута. Важно отметить, что явления смены знака или изломов F/S - кривых (см. F/S - кривую по данным ТР № 38 на участке от $60\% F_p$ до $100\% F_p$) могут происходить неоднократно, в зависимости от сложности силовой схемы конструкции. В этих случаях экстраполяцию F/S - кривых для прогноза следующей нагрузки местной неустойчивости или нагрузки разрушения необходимо вести без учета данных, полученных до описанных выше явлений.

Поведение F/S - кривых, построенных по данным ТР № 2, 3 говорит о том, что шпангоут включился в работу медленнее обшивки. Близкое к параллельному оси F на участке от $F = 60\% F_p$ до $F = 180\% F_p$ направление F/S - кривой, построенной по показаниям ТР № 38, свидетельствует о линейной зависимости деформации от нагрузки. На участке нагружения, предшествующем общей потери устойчивости, большинство F/S - кривых стремятся к оси F , и экстраполяция их до нее дает удовлетворительный прогноз разрушающей нагрузки. Важно отметить, что указанное свойство F/S - кривых присуще как для отрицательных, так и положительных деформаций. С одной стороны, это объясняется тем, что в окружном и меридиональном направлениях перед потерей устойчивости конструкции формируется ряд полуволн, и одни тензорезисторы оказываются в зонах их пучности, а другие - в зонах впадин. С другой стороны, разрушение конструкции может быть достигнуто из-за превышения положительными деформациями деформаций, соответствующих пределу пластичности. Возможность прогноза подобных явлений с помощью F/S - кривых пояснено ниже. Исходя из вышеизложенного, следует заключить, что анализ F/S - кривых и достоверный прогноз по ним критических нагрузок достаточно сложная задача.

Метод Саусвелла и его деформационная модификация, F/S -метод, выше были рассмотрены применительно к прогнозу критических нагрузок потери устойчивости стержней, пластин и оболочек, работающих в пределах упругости. Однако, в реальных конструкциях, в особенности выполненных из композиционных материалов, в процессе продольно-поперечного изгиба могут возникнуть пластические деформации, микротрещины, разрыв несущих слоев их отслоение от наполнителя, значительно снижающие нагрузку потери устойчивости. Поэтому при прочностных испытаниях сложных конструкций основной прогнозируемой величиной должна быть нагрузка исчерпания несущей способности.

Под исчерпанием несущей способности конструкции будем понимать ее разрушение за счет потери устойчивости, появления пластических деформаций или достижения уровня предела прочности, как при положительных, так и отрицательных деформациях. При рассмотрении явлений потери устойчивости применительно к простейшим конструктивным элементам критические нагрузки могут совпадать с нагрузками исчерпания несущей способности.

Учитывая и обобщая на самый широкий класс конструкций опыт авторов работы [139], для прогноза нагрузок исчерпания несущей способности наложим на F/S - кривые

линии, ограничивающие уровни так называемых предельных деформаций (предельные прямые), при достижении которых конструкция или ее элемент разрушается. Покажем некоторые способы получения предельных прямых путем сопоставления F/S - кривых и диаграмм растяжения - сжатия образцов, полученных на основании ряда специальных экспериментов.

На рис. 5.4 приведены диаграммы сжатия и F/S - кривые для двух продольно сжатых стержней уголкового профиля, выполненных из сплава АМгб.

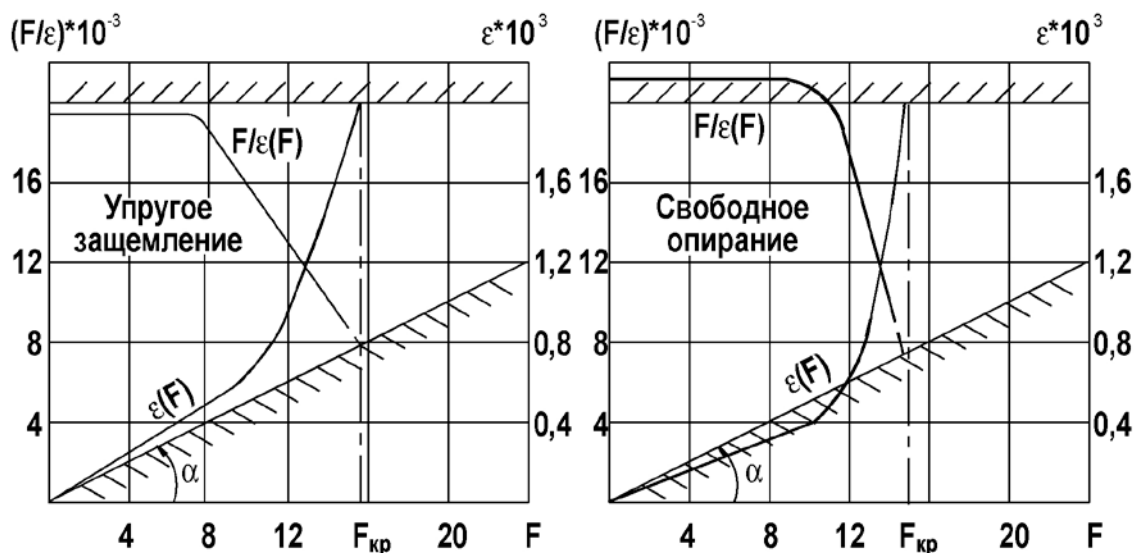


Рис. 5.4. Определение предельных нагрузок исчерпания несущей способности стержней при продольном сжатии

Испытаниям подвергались стержень, упруго защемленный по обоим концам, и стержень, торцы которого свободно опирались на площадки, передающие усилие. В качестве S здесь, как и на последующих двух рисунках, принята величина деформации, замеряемая одиночным тензорезистором. Линия предельной деформации в координатах $F - \epsilon$ представляет собой прямую $\epsilon = \epsilon_{np}$, параллельную оси F . За ϵ_{np} принята деформация при

условном пределе текучести ($\epsilon_{\tau} = 0,2\%$). В координатах $\frac{F}{\epsilon} - F$ линия предельной деформации проходит через начало координат и образует с осью F угол α , тангенс которого равен величине $1/\epsilon_{np}$.

На рис. 5.5 представлены диаграмма растяжения и F/S - кривая, полученные по данным работы [97] для стержня из легированной стали.

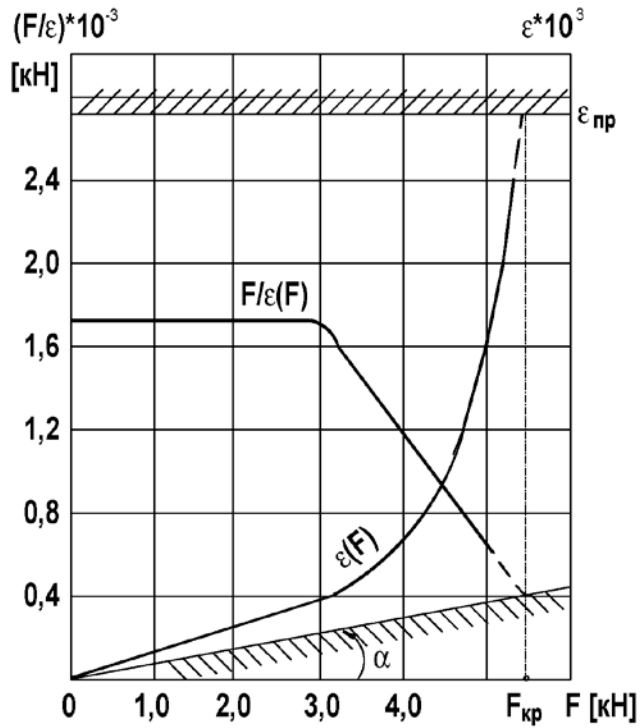


Рис. 5.5. Определение предельных нагрузок исчерпания несущей способности стержня из легированной стали при его растяжении

Приведенная диаграмма разрушения не имеет площадки текучести и приводит только к двум участкам F/S - зависимости. Первый участок (до предела пропорциональности) параллелен оси F , а второй, наклонный, при пересечении с предельной прямой дает разрушающую нагрузку $F_{кр}$.

Более сложный случай деформирования растянутого стержня по данным работы [78] представлен на рис. 5.6.

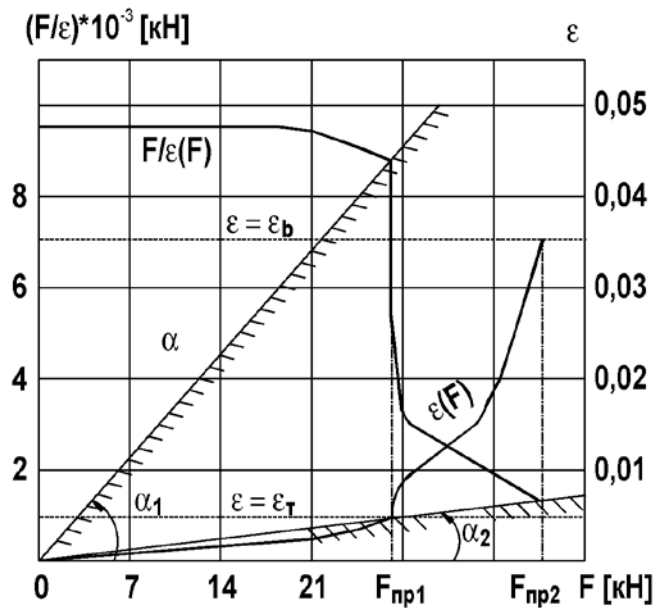


Рис. 5.6. Определение предельных нагрузок исчерпания несущей способности стержня из малоуглеродистой стали при его растяжении

Материал образца, малоуглеродистая сталь, имеет явно выраженную площадку текучести. При обработке результатов этого эксперимента имеет смысл использовать две предельные прямые и прогнозировать как уровень нагрузки, соответствующий площадке текучести F_{np1} , так и разрушающую нагрузку F_{np2} . На рис. 5.6 пунктиром показаны предельные прямые в координатах $F - \varepsilon$.

Необходимо отметить, что линейная зависимость F/S от F , показанная на рисунках 5.4...5.6, отражает частные простейшие случаи нагружения. При сложном напряженном состоянии их линейность нарушается, однако по-прежнему они дают предельные нагрузки при пересечении с предельными прямыми.

Правильный выбор ε_{np} является залогом достоверности прогнозирования. Вообще говоря, предельные деформации для каждой точки, где производились замеры, различны. Их определение расчетным путем или экспериментально является отдельной достаточно сложной задачей.

В последующем изложении условимся обозначать истинные значения параметров критических нагрузок ^{*)}, полученные путем испытаний до разрушения, общей потери устойчивости через $F_{кр}$, местной - через $\bar{F}_{кр}$. Прогнозируемые значения этих величин будем обозначать соответственно через $F_{кр}^*$ и $\bar{F}_{кр}^*$.

Принимая во внимание сложность конструкции КА, в особенности, изготовленной из композитных материалов, а также сложность ее напряженно-деформированного состояния при эксплуатации, для экспериментальных исследований прочности реальных изделий используется большое количество тензорезисторов.

Типовая схема замеров деформаций на элементе головного обтекателя КА, выполненного из КМ представлена на рис. 5.7.

^{*)} Под критическими при использовании предельных прямых понимается нагрузка исчерпания несущей способности.

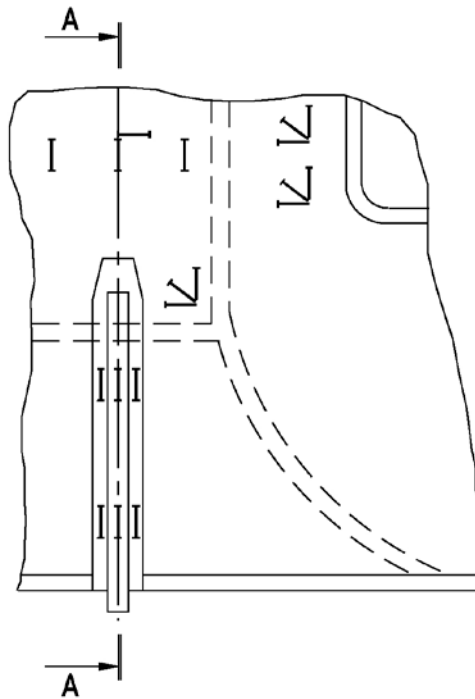


Рис. 5.7. Схема замера деформаций на элементе головного обтекателя КА

На подкрепляющих элементах изделия, работающих в условиях одноосного деформирования, наклеиваются одиночные тензорезисторы. Зоны окантовок люков контролируются повышенным количеством тройных розеток, гладкие поверхности снабжены как тройными, так и двойными, уголковыми розетками тензорезисторов, наклеенными на несущие слои КМ друг под другом попарно. НДС фитингов, стыковочных узлов, шпангоутов и других особо ответственных с прочностной точки зрения узлов конструкции нуждаются в контроле большим количеством тензорезисторов, установленных в заданных направлениях.

Таким образом, в общем случае прочностных испытаний реальных конструкций обобщенная деформация может, в зависимости от способа ее измерения, приниматься равной:

- при замере деформации одиночным k -тым тензорезистором

$$S = \varepsilon_k; \quad (5.21)$$

- при замере деформации изгиба в случае одностороннего деформированного состояния парой тензорезисторов, наклеенных друг над другом,

$$S = \frac{\varepsilon_k - \bar{\varepsilon}_k}{2}, \quad (5.22)$$

где ε_k и $\bar{\varepsilon}_k$ - деформации пары тензорезисторов;

- при замере деформации изгиба в случае плоского напряженного состояния парой наклеенных друг под другом розеток тензорезисторов

$$S = \frac{\varepsilon_{\alpha k} - \bar{\varepsilon}_{\alpha k}}{2} + \frac{\varepsilon_{\beta k} - \bar{\varepsilon}_{\beta k}}{2}, \quad (5.23)$$

где $\varepsilon_{\alpha k}$, $\bar{\varepsilon}_{\alpha k}$ и $\varepsilon_{\beta k}$, $\bar{\varepsilon}_{\beta k}$ - деформация во взаимоперпендикулярных направлениях;

- при замере деформации срединной поверхности в случае одноосного деформированного состояния

$$S = \frac{\varepsilon_{\kappa} + \bar{\varepsilon}_{\kappa}}{2}; \quad (5.24)$$

– при плоском напряженном состоянии

$$S = e_i = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2}, \quad (5.25)$$

где e_i - интенсивность деформации,

ε_1 и ε_2 - главные деформации, выражаемые соотношением:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{90} + \varepsilon_0}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2},$$

в котором ε_0 , ε_{45} , ε_{90} - деформации, полученные по показаниям тензорезисторов тройной розетки *) (порядок ориентации и нумерации тензорезисторов изложен в разделе 4.1);

– при определении деформации изгиба в случае плоского напряженного состояния:

$$S = \frac{e_i - \bar{e}_i}{2}, \quad (5.26)$$

где e_i и \bar{e}_i - интенсивности деформаций, посчитанные по данным тензометрических розеток, расположенных друг под другом;

– при замере деформаций серединой поверхности в случае плоского напряженного состояния:

$$S = \frac{e_i + \bar{e}_i}{2}. \quad (5.27)$$

Анализ F/S - кривых, полученных в работах [99,101,129,139] и в ходе экспериментов, проведенных авторами, показывает следующее.

1. Исчерпанию несущей способности сложной конструкции может предшествовать неоднократная перестройка волнообразования, вызванная явлениями типа местной потери устойчивости, или местного разрушения, т.е. можно сказать, что процесс деформирования реальной конструкции имеет несколько ветвей, асимптотическая экстраполяция которых даст прогноз очередного волнообразования.

2. Определение нагрузок исчерпания несущей способности зависит от величины предельных деформаций, в качестве верхних оценок которых могут быть взяты значения деформаций, соответствующие пределам текучести или прочности материала.

3. Общая потеря устойчивости в одну из перестроек волнообразования может совпасть с местной, и поэтому для принятия правильных решений по нагружению конструкции с обеспечением безусловного ее сохранения, испытателю необходимо иметь достоверный прогноз каждой перестройки волнообразования, одновременно обеспечивающий некоторый запас по устойчивости.

При прогнозе несущей способности аэрокосмических конструкций, как правило, используют предельные деформации. Опыт показывает, что в большинстве случаев для определения величины $F_{кр}^*$ целесообразно вместо $S = \varepsilon_{\kappa}$ использовать переменную вида:

*) В случаях, когда известны направления главных деформаций, используются уголкового (двойные) розетки и тогда $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{90}$.

$$D = \frac{\varepsilon_{\kappa}}{\varepsilon_{np}}, \quad (5.28)$$

где ε_{np} - предельная деформация.

Тогда интересующие нас кривые в координатах $F/D, F$ могут быть приведены к типовому виду, представленному на рис. 6.8.

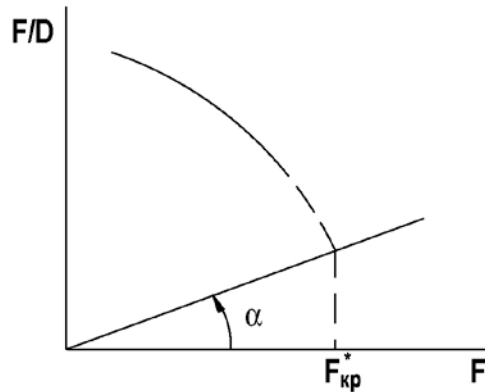


Рис.5.8. Определение $F_{кр}^*$ в координатах $F/D, F$

Значение $tg\alpha = 1$ при одинаковых масштабах по осям F/D и F .

Очевидно, что предельное состояние конструктивного элемента достигается при значениях

$$D = 1. \quad (5.29)$$

Соотношение (5.29) определяет универсальный критерий разрушения конструкции как в силу потери ее устойчивости, так и при достижении напряжениями величины предела прочности. В последующем изложении переменную D будем называть обобщенным деформационным параметром. Введение обобщенного параметра D вызвано следующими соображениями:

1. Реальные конструкции работают в сложном напряженном состоянии и имеют как сжатые, так и растянутые зоны. Одинаковый вид обобщенного параметра для прогноза устойчивости и прочности упрощает математическую обработку данных.

2. Параметр D в виде, показанном ниже, дает возможность учитывать одновременно действие сжатия, сдвига, позволяет использовать значения предельных деформаций в двух направлениях.

Если ε_{np} характеризует предельную деформацию сжатия $\varepsilon_{np}^{сж}$, при которой происходит потеря устойчивости элемента конструкции, то параметр D вида (5.28) является параметром устойчивости. Если же в качестве ε_{np} использовать величину $\varepsilon_{np}^{раст}$, например, соответствующую σ_{τ} или σ_{ν} , то формула (5.28) дает параметр прочности.

Покажем вид обобщенного параметра D , соответствующий каждому из рассмотренных выше случаев замера деформаций (см. формулы 5.22...5.27). Формула 5.22 дает обобщенный параметр вида:

$$D = \frac{\varepsilon_{\kappa} - \bar{\varepsilon}_{\kappa}}{2\varepsilon_{np}}, \quad (5.30)$$

где в качестве ε_{np} в каждом конкретном случае использования того или иного материала принимается меньшая из величин $\varepsilon_{np}^{сж}$ и $\varepsilon_{np}^{раст}$.

При испытаниях элементов конструкций, работающих в упругой зоне, критические деформации могут быть меньше предельных. Тогда теряет смысл использование параметра вида (5.30), и прогноз будет осуществляться экстраполяцией F/S - кривой (S имеет вид 5.22) до оси F .

Формула (5.24) дает обобщенный параметр вида:

$$D = \frac{\varepsilon_k + \bar{\varepsilon}_k}{2\varepsilon_{np}}, \quad (5.31)$$

где в качестве ε_{np} принимаются величины $\varepsilon_{np}^{сж}$ или $\varepsilon_{np}^{раст}$ в зависимости от знака деформации в зоне измерений.

Обычно при двухосном напряженно-деформированном состоянии лучшие результаты дает замена в формуле (5.28) величины ε_k на ε_{ik} , получаемую по показаниям k -той тройной тензометрической розетки.

Параметр вида:

$$D = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{np}} \quad (5.32)$$

также может быть использован в зависимости от вида ε_{np} для прогноза устойчивости или прочности. Здесь условно символом ε_{np} обозначена минимальная предельная деформация.

Для сложного напряженного состояния при наклеике тензометрических розеток с одной стороны оболочки Джонсом и Грином, Фишером [130,139] предложено использовать параметры видов:

$$D = \frac{\varepsilon_{\alpha k}}{\varepsilon_{\alpha np}^0} + \frac{\varepsilon_{\beta k}}{\varepsilon_{\beta np}^0}; \quad (5.33)$$

$$D = \frac{\varepsilon_{\alpha k}}{\varepsilon_{\alpha np}^0} + \frac{\varepsilon_{\beta k}}{\varepsilon_{\beta np}^0} + \left(\frac{\gamma_k}{\gamma_{np}^0} \right)^2, \quad (5.34)$$

где $\varepsilon_{\alpha np}^0$, $\varepsilon_{\beta np}^0$, γ_{np}^0 - предельные деформации при однокомпонентном (во взаимоперпендикулярных направлениях α и β) деформировании до потери устойчивости;

$$n = 1, 5 \dots 2.$$

Здесь под однокомпонентным деформированием принимается такое нагружение элемента конструкции сжимающими или растягивающими усилиями в двух направлениях,

при котором деформации в одном направлении равны нулю. Например, при сжатии изотропной пластины напряжениями σ_x и σ_y .

Величина $\varepsilon_x = 0$ при $\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \mu$, а при сжатии ортотропной пластины $\varepsilon_x = 0$ при

выполнении соотношения $\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{E_1}{E_2} \mu_2$.

Предельные деформации определяют экспериментально в специальных установках на образцах-свидетелях. При испытаниях образцов на чистый сдвиг $\gamma_{кр}^0$ рассчитывается по показаниям тройной тензометрической розетки в момент, предшествующий потере устойчивости либо разрушению по формуле:

$$\gamma_{кр}^0 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \sqrt{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}. \quad (5.35)$$

При наличии розеток тензорезисторов, расположенных друг под другом по обеим поверхностям оболочки или пластины и возможности замеров соответствующих деформаций $\varepsilon_{\alpha k}$, $\varepsilon_{\beta k}$ и $\bar{\varepsilon}_{\alpha k}$, $\bar{\varepsilon}_{\beta k}$ представляются целесообразным по аналогии с (5.33) с учетом (5.24) обобщенный параметр представить в виде:

$$D = \frac{\varepsilon_{\alpha k} + \bar{\varepsilon}_{\alpha k}}{2\varepsilon_{\alpha pr}} + \frac{\varepsilon_{\beta k} + \bar{\varepsilon}_{\beta k}}{2\varepsilon_{\beta pr}}, \quad (5.36)$$

где в качестве $\varepsilon_{\alpha pr}$, $\varepsilon_{\beta pr}$, как и в (5.30), принимается меньшая из величин $\varepsilon_{pr}^{сж}$ и $\varepsilon_{pr}^{раст}$.

5.3. Методика и технические средства обеспечения НСИ

В настоящем разделе рассмотрена методика подготовки и проведения неразрушающих статических испытаний, а также необходимые для их реализации дополнения к техническим средствам АИК СИГМА-М, представленного в предыдущей главе.

На рис. 5.9 приведена схема обеспечения НСИ, из которой следует, что качественное проведение НСИ требует:

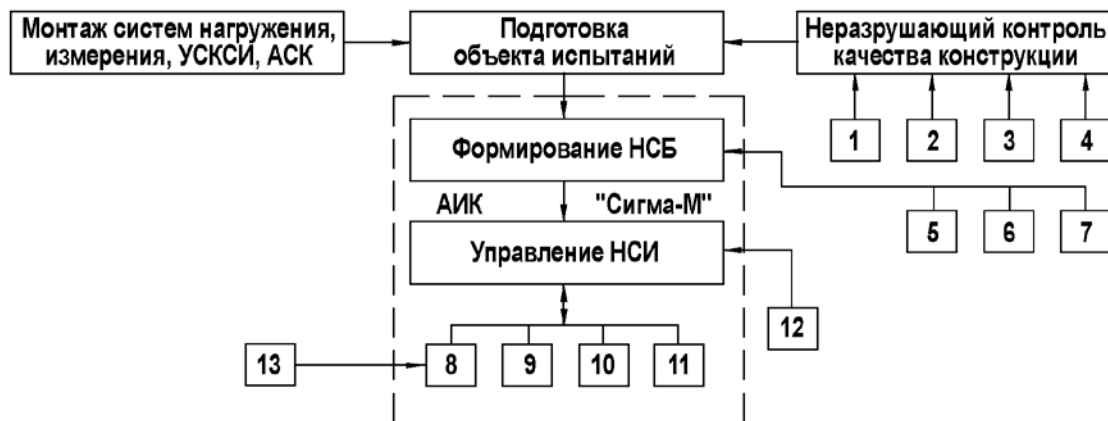


Рис. 5.9. Схема обеспечения НСИ:

1 - визуально-оптический метод; 2 - метод проникающих составов; 3 - ультразвуковой метод; 4 - метод акустической эмиссии; 5 - замер координат узлов тензометрирования; 6 - замер модуля упругости в узлах тензометрирования; 7 - электрические проверки системы измерения, кроссировки кабельной сети; 8 - АСУН ПРОЧНОСТЬ-3; 9 - ИИС К742/1 (ИИС на базе радиометрических модулей типа РСМ8-1); 10 - АС ПРОГНОЗ-К; 11 - УСКСИ; 12 - система отображения и документирования данных испытаний; 13 - АСК

– специальной подготовки объекта испытаний, заключающейся в углубленном контроле качества материала изделия одним или несколькими методами (см. поз. 1...4 рис. 5.9), в установке на изделии датчиков описанных ниже автомата сохранения конструкции (АСК) и ультразвуковой системы контроля состояния изделия (УСКСИ);

– формирования нормативно-справочной базы на основе замеров фактических координат узлов тензометрирования, замеров модулей упругости материала конструкции в местах их размещения, кроссировки кабельной сети ИИС и ее последующей проверки;

– работы таких подсистем АИК, как АСУН ПРОЧНОСТЬ-3, ИИС К742/1 (ИИС на базе РСМ8-1), подключения к испытательному комплексу математического обеспечения ПРОГНОЗ-К, АСК, УСКСИ, доработки систем отображения и документирования данных испытаний в части вывода результатов прогноза прочности и устойчивости конструкции.

Обобщенный метод поэтапного нагружения объекта испытаний лежит и в основе проведения НСИ, однако, проводимая в этом случае в 3 этапа (10, 15, 20 % F_p) опрессовка изделия приобретает особое значение для работы программ подсистемы (ПС) ПРОГНОЗ-К. Эта опрессовка предназначена для правильного выбора тензорезисторов, по показаниям которых должен вестись прогноз прочности либо устойчивости.

Определяются места установки ТР для работы АСК (зоны максимальных сжимающих напряжений на силовых элементах конструкции) и ультразвуковых излучателя и приемников системы УСКСИ (зоны предполагаемой мест-

ной потери устойчивости). Опрессовка конструкции служит также для проверки всех электрических систем испытуемого изделия, корректировки НСБ, проверки правильности установки датчиков перемещений.

Дальнейший ход испытаний отличается от традиционного только информативностью и повышенной длительностью поддержания нагрузок на этапных площадках для обеспечения возможности работы ПС ПРОГНОЗ-К. Как правило, это время не превышает в штатной ситуации 2...4 мин.

Блок схема подсистемы ПС ПРОГНОЗ-К представлена на рис. 6.10.

После окончания опрессовки (этапы нагружения $n = 1, 2, 3$) АСУН ПРОЧНОСТЬ-3 обеспечивает обращение к программе ИЗМЕРЕНИЕ системы СИГМА-М после каждого j -го приращения нагрузки на 5 % от расчетной.

Тем самым формируется рабочий массив деформаций $\varepsilon_{j,k}^M$ (здесь M - номер группы тензорезисторов, выделенных при подготовке НСБ из общей массы ТР для ведения прогноза, k - номер узла тензометрирования).

Обработка накопленного массива значений деформаций $\varepsilon_{j,k}^M$ происходит при достижении нагрузкой величины очередного этапа нагружения. В зависимости от программы испытаний за этап нагружения принимается равномерное приращение нагрузки на 10, 15, 20 или 25 % от расчетной.

Программа нагружения построена таким образом, что впервые прогноз критических нагрузок может быть получен при $n = 4$ ($n = 3$ соответствует окончанию опрессовки).

Система нагружения обеспечивает приращение 10% нагрузки не более чем за 5 минут, независимо от числа используемых силовозбудителей. После достижения нагрузками величин, соответствующих концу очередного этапа, прирост нагрузки прекращается, и вызывается подсистема ПРОГНОЗ-К. Важнейшие ее блоки на рис. 5.10 обозначены цифрами. Алгоритмы прогнозирования несущей способности реализуют следующую методику прогноза.

В блоке 1 осуществляется подготовка количественного прогнозирования, которая заключается в сортировке ТР по взаимному расположению, типам розеток и в выборе параметров прогноза по результатам опрессовки с использованием информации, заранее введенной в НСБ.

В блоке 2 производится формирование моделей трендов изменения жесткостных характеристик. В ходе нагружения конструкции во всех узлах тензометрирования замеряются деформации и создаются массивы отношений нагрузок к обобщенной деформации или обобщенным деформационным параметрам. Далее производятся операции по регистрации перестройки волнообразования: запрашивается УСКСИ (есть явления местной неустойчивости или нет), анализируются замеряемые деформации. Если по показаниям хотя бы одного ТР из M -ой группы (зоны) зафиксирована смена знака деформации и УСКСИ зафиксировала явления типа местной потери устойчивости в изделии, то производится коррекция массивов $(F/D)_{j,k}^M$ и $(F/S)_{j,k}^M$ по перестройке волнообразования, т.е. в дальнейшем будут рассматриваться показа-

ния ТР *M*-ой группы, снятые только после указанной перестройки. Другими словами, закладывается основа учета снижения эффективной жесткости всей конструкции при потере устойчивости отдельных ее элементов.

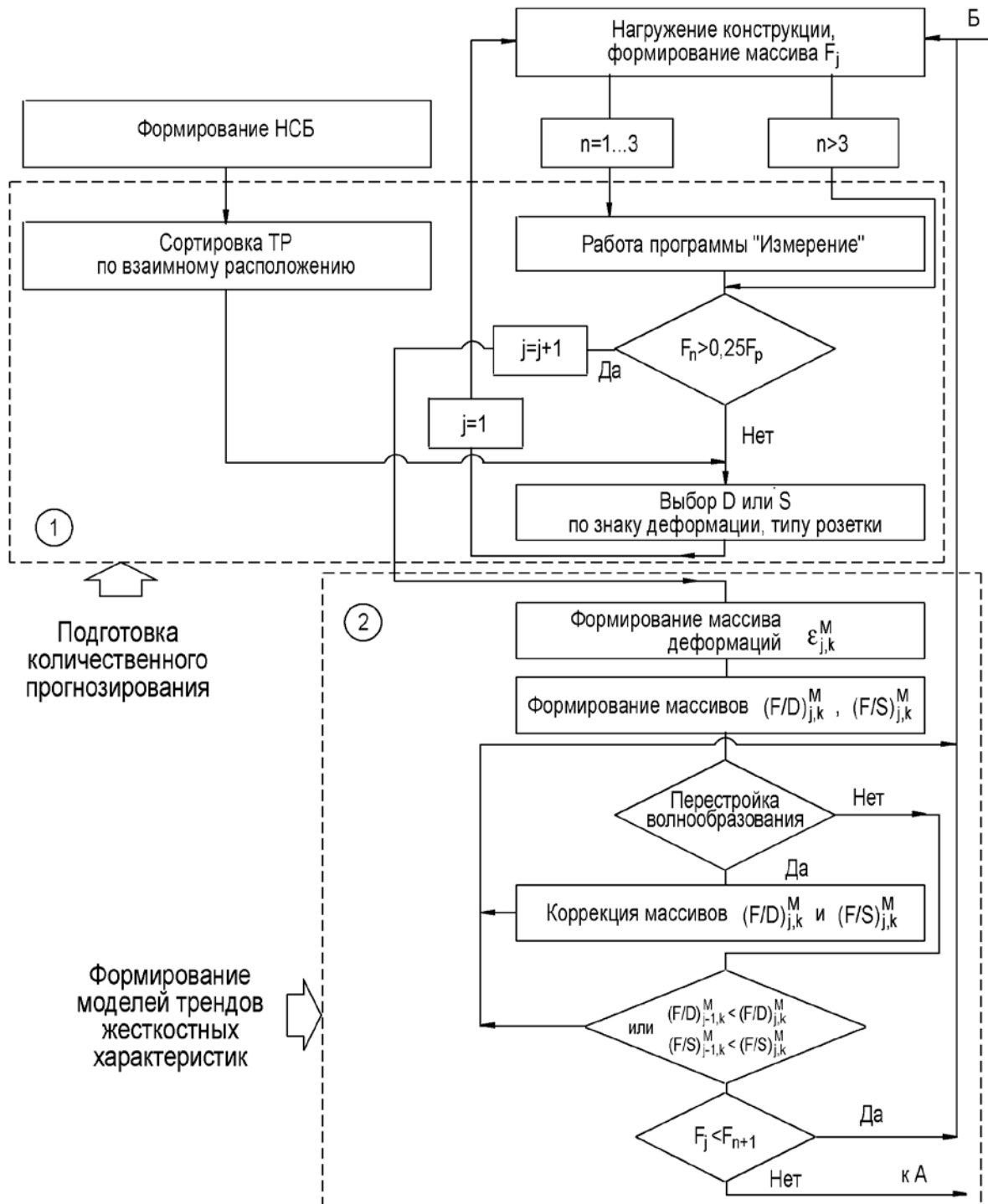


Рис. 5.10. Блок-схема ПС ПРОГНОЗ-К

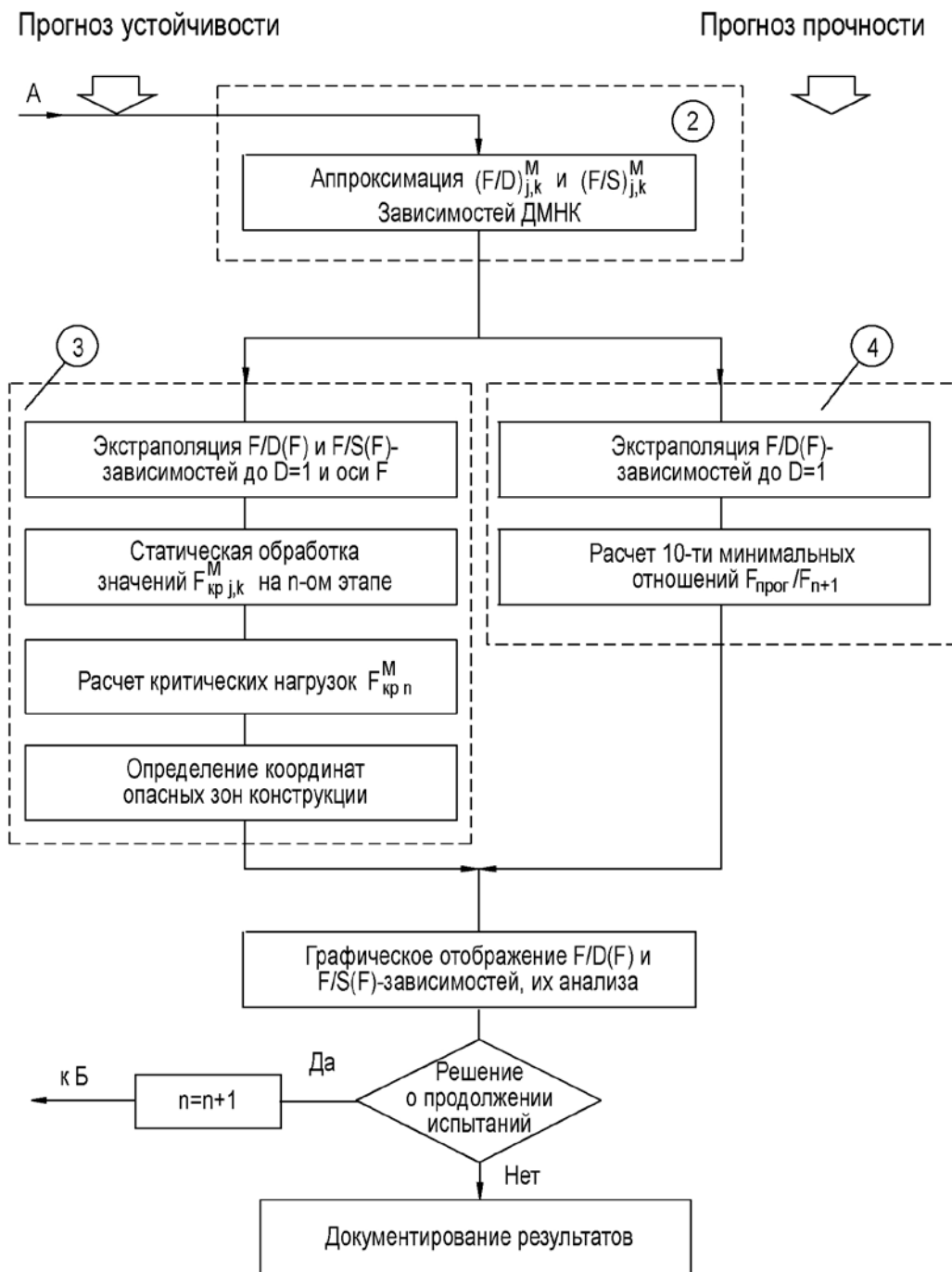


Рис. 5.10 (продолжение). Блок-схема ПС ПРОГНОЗ-К

Следующей операцией блока 2 является анализ зависимостей F/D и F/S от F . Если по мере роста нагрузки абсолютная величина $|F/D|$ или $|F/S|$ уменьшается и выполняется условие

$$\left| (F/D)_{j-1,k}^M \right| > \left| (F/D)_{j,k}^M \right|, \quad (5.37)$$

то зависимости F/D или F/S от F аппроксимируются. В противном случае указанные зависимости из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Аппроксимация этих массивов линейным или квадратичным полиномом дисконтированным методом наименьших квадратов, учитывающим снижение информативной ценности предыдущих отсчетов по сравнению с последующими, дает модели искомым трендов.

В блоке 3 осуществляется прогноз устойчивости путем экстраполяции полиномов, полученных по данным узлов тензометрии, расположенных в сжатых зонах, до оси нагрузок или до линии, тангенс угла наклона которой к этой оси равен единице. Полученные по данным всех узлов тензометрирования значения критических усилий проходят статистическую обработку на каждом этапе нагружения. По ее окончании и выдаче на печать и дисплей прогнозируемой критической нагрузки определяются 10 узлов тензометрирования, по данным которых получены минимальные значения прогнозируемых критических нагрузок.

Практика анализа результатов испытаний показывает, что удобнее рассматривать отдельно положительные и отрицательные деформации. В связи с этим и с целью упрощения алгоритма прогноза несущей способности конструкции в дальнейшем *прогноз по отрицательным деформациям назовем прогнозом устойчивости, а по положительным - прогнозом прочности.*

Сделаем некоторые пояснения к работе блока 3. Проводимая в нем статистическая обработка прогнозируемых критических нагрузок на n -ом этапе M -ой группы ТР, получаемых по данным k -го узла тензометрирования, заключается в поиске следующих величин:

– математического ожидания величины, прогнозируемой на n -ом этапе критической нагрузки

$$M_F = \frac{1}{\bar{m}} \sum_{k=1}^{\bar{m}} F_{крn,k}^M; \quad (5.38)$$

– дисперсии

$$D_F = \frac{1}{\bar{m} - 1} \sum_{k=1}^{\bar{m}} \left(F_{крn,k}^M - M_F \right)^2; \quad (5.39)$$

– среднеквадратичного отклонения

$$\sigma_F = \sqrt{D_F}. \quad (5.40)$$

Статистической обработке подвергаются \bar{m} прогнозируемых критических нагрузок, удовлетворяющих условию

$$F_n < F_{крп,k}^M < F_{оц}, \quad (5.41)$$

где F_n - нагрузка текущего этапа нагружения, $F_{оц}$ - оценка критической нагрузки, выбранная из условия, что действительная критическая нагрузка превышает расчетную нагрузку не более чем в три раза.

Далее рассматривается условие исключения грубых ошибок прогноза с вероятностью 95 %, которое выражается неравенством

$$\left| F_{крп,k}^M - M_F \right| < 2,5 \sigma_F \sqrt{\frac{\bar{m} + 1}{\bar{m}}}. \quad (5.42)$$

Коэффициент 2,5 при σ_F в этом неравенстве принят в соответствии с [81]. Если неравенство не выполняется, то величина $F_{крп,k}^M$ считается ошибочной и в дальнейшем не рассматривается. Прошедшие через логические фильтры (6.41) и (6.42) величины критических нагрузок (их количество равно \bar{m}_0) усредняются по формуле

$$F_{крп}^{*M} = \frac{\sum_{k=1}^{\bar{m}_0} F_{крп,k}^M}{\bar{m}_0}. \quad (5.43)$$

На каждом n -ом этапе нагружения прогнозируемые значения критических нагрузок выводятся на экран дисплея и печать в соответствии с таблицей 5.1.

Таблица 5.1

Прогноз устойчивости	
Нагрузка $F_n = \dots \% F_p$	
№ зоны	$F_{крп}^* (\% F_p)$
1	120
...	...
5	110

Таблица 5.2

Прогноз прочности	
Нагрузка $F_n = \dots \% F_p$	
№ зоны	$k = F_{крп}^* / F_{n+1}$
2	1,3
...	...
6	1,8

В блоке 4 производится прогноз прочности путем экстраполяции полиномов, вычисленных по данным узлов тензометрирования, расположенных в растянутых зонах, до линии, угла наклона которой к оси нагрузок $\alpha = 45^0$. Далее производится расчет и выдача на дисплей и печать десяти минимальных отношений прогнозируемых разрушающих нагрузок к нагрузке следующего этапа нагружения (табл. 5.2).

Как отмечалось выше, специальными техническими средствами НСИ, в частности, являются автомат сохранения конструкции и ультразвуковая сис-

тема контроля состояния изделия. Эти технические средства разработаны в ЦСКБ и могут быть заменены другими, которые позволяют повышать как достоверность прогноза, так и надежность сохранения конструкции без разрушения до полного выполнения программы испытаний.

Автомат сохранения конструкции предназначен для дублирования ПС ПРОГНОЗ-К и по существу представляет собой специальный микропроцессор, реализующий процесс экстраполяции F/S - прямых, строящихся по показаниям небольшого количества тензорезисторов ($\kappa = 5$), наклеиваемых в наиболее опасных зонах конструкции и обеспечивающий выдачу команды на отключение МНС. Места расположения необходимых ТР устанавливаются по результатам опрессовки или расчетно-аналитическим путем. В АСК F/S - прямые строятся только через две последние точки (обозначим их через $j-1$ и j) замеров деформаций и усилий, которые непрерывно производятся цифровыми мостами.

Перед началом испытаний в память АСК вводятся следующие постоянные:

α - угол наклона предельной прямой, безразмерная величина;

A - тарировочный коэффициент тензодинамометра, который отражает линейную зависимость между деформацией, замеряемой ТР тензодинамометра, и нагрузкой в процентах от расчетной.

Считается, что создаваемые всеми силовозбудителями нагрузки имеют одинаковые относительные приращения за время между двумя $j-1$ и j замерами деформаций и нагрузок.

АСК реализует алгоритм, представленный на рис. 5.11. По команде с управляющей ЭВМ или команде, выдаваемой с клавиатуры процессора АСК (до запуска основной системы измерений НДС конструкции), производится съем и запись массива нулевых отсчетов $N_{0\kappa}$ ТР на конструкции ($\kappa = 1...5$ - номер ТР) и N_{0m} ТР тензодинамометра, имеющего номер m . Включается счетчик номеров измерений j (номеров отсчетов) и формируется команда на запуск цифровых мостов. Для каждого j записывается массив значений N_{jk} , N_{jm} . Производится расчет замеренных деформаций ε_{jk} , ε_{jm} по формулам:

$$\varepsilon_{jk} = \frac{C(N_{0\kappa} - N_{jk})}{\kappa_T \left(\frac{1}{R} + CN_{jk} \right)}; \quad (6.44)$$

$$\varepsilon_{jm} = \frac{C(N_{0m} - N_{jm})}{\kappa_T \left(\frac{1}{R} + CN_{jm} \right)}, \quad (6.45)$$

где κ_T - коэффициент тензочувствительности; R - наибольшее значение сопротивления ТР, Ом; C - единица дискретности, Ом/деление.

Величины R и C взаимосвязаны применительно к используемым цифровым мостам. АСК работает в одном диапазоне измерений, в котором $R = 205,0$ Ом, $C = 1,22$ Ом/деление.

Значение параметра нагрузки, соответствующего j -му отсчету, определяется формулой

$$F_j = A\varepsilon_{jm} \quad (5.46)$$

и выражает отношение действующей нагрузки к расчетной, для которой $F_j = 1$.

При $j \geq 2$ производится расчет критических усилий $F_{крjk}$ по формуле

$$F_{крjk} = \frac{F_{j-1}F_j(\varepsilon_{jK} - \varepsilon_{j-1,K})}{\operatorname{tg}\alpha\varepsilon_{j-1,K}\varepsilon_{jK}F_j - \operatorname{tg}\alpha\varepsilon_{j-1,K}\varepsilon_{jK}F_{j-1} - F_j\varepsilon_{j-1,K} - F_{j-1}\varepsilon_{jK}}, \quad (5.47)$$

которая дает точку пересечения F/S - прямой, проходящей через точки $(F_{j-1}/\varepsilon_{j-1,K}, F_{j-1})$ и $(F_j/\varepsilon_{jK}, F_j)$, и предельной прямой вида $F/\varepsilon = Ftg\alpha$.

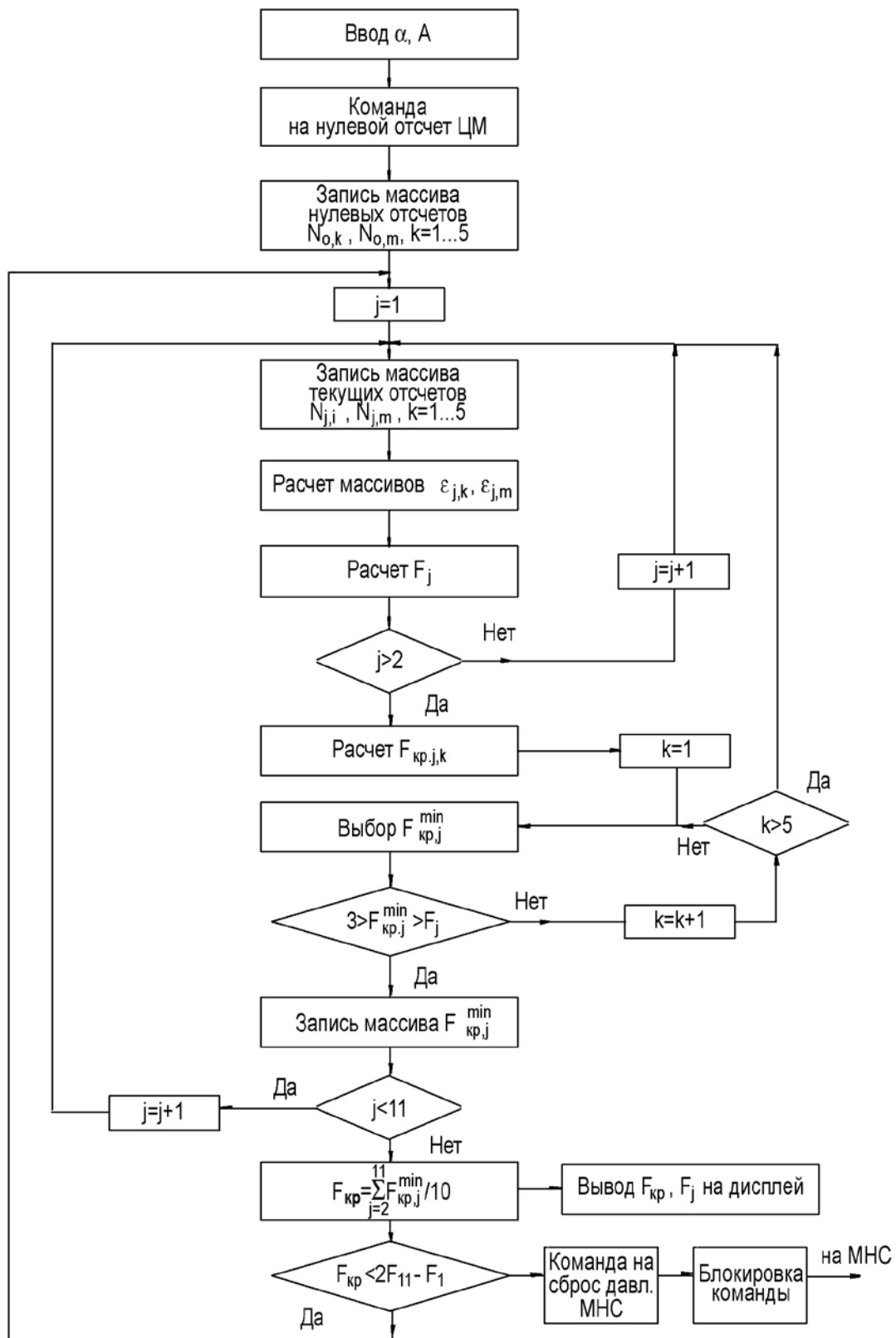


Рис. 5.11. Структурная схема алгоритма работы АСК

Из полученных $F_{крjк}$ выбирается и записывается в память АСК минимальное значение $F_{крj}^{min}$. В связи с тем, что F/S - прямая может быть восходящей или близкой к параллели оси F , то необходимо в алгоритме обработки значений $F_{крj}^{min}$ иметь два очевидных фильтра. Если $F_{крj}^{min} > F_j$, т.е. прогнозируемая критическая нагрузка больше нагрузки в момент j -го отсчета, и $F_{крj}^{min} < 3$ (допускается, что истинная критическая нагрузка не более чем в три раза превышает расчетную), то $F_{крj}^{min}$ заносится в массив минимальных критических значений. В противном случае осуществляется повторный поиск $F_{крj}^{min}$ из оставшихся значений $F_{крjк}$. Если ни одно из них не удовлетворяет вышеназванным условиям, снимается следующий отсчет. Описанные выше операции повторяются до $j = 11$, накапливается массив значений $F_{крj}^{min}$, по которым рассчитывается среднее значение критической нагрузки

$$F_{кр}^* = \sum_{j=2}^{11} \frac{F_{крj}^{min}}{10}. \quad (5.48)$$

Число отсчетов, равное 11, выбрано из условия фиксации значения $F_{кр}^*$ на цифровом табло или экране монитора, на которых оно удерживается до выполнения очередного цикла измерений.

В случае, когда величина $F_{кр}^*$ попадает в интервал между значением F_{11} и значением $F_{11} + (F_{11} - F_1)$, потеря устойчивости может наступить до расчета прогнозируемой критической нагрузки, полученной по данным последующего цикла измерений, поэтому необходим анализ условия

$$F_{кр}^* > 2F_{11} - F_1. \quad (5.49)$$

При его выполнении выдается команда на снятие очередного цикла отсчетов. Если условие (5.49) не выполняется, то производится формирование команды на сброс давления предохранительным клапаном маслонасосной станции, а также на выдачу светового и звукового сигнала.

Как уже отмечалось выше, достоверность прогноза исчерпания несущей способности конструкции во многом зависит от своевременной регистрации всех явлений, которые снижают ее жесткость. Для металлических оболочек - это хлопки, волнообразование, а для композиционных материалов - расслоение, образование трещин, разрывов отдельных слоев, развитие технологических дефектов. Своевременное обнаружение этих эволюций по характеру F/S - кривых, особенно при небольшом количестве тензорезисторов, весьма затруднительно. Поэтому применяют комбинированные методы прогноза, а точнее, контроля состояния испытуемого изделия. В частности, в дополнение

к F/S -методу могут применяться методы на основе исследований ультразвуковых колебаний (УЗК) малой мощности.

Подобные колебания могут возникать в материале самопроизвольно за счет локальной динамической перестройки его структуры. Это явление известно под названием акустической эмиссии (АЭ). Акустическая эмиссия наиболее выражена при резком изменении формы тела, образовании в нем трещин, появлении пластических деформаций и т.п. [4,20,32,120].

Наиболее информативными параметрами, характеризующими АЭ, являются: амплитуда импульса, длительность импульса, время прихода сигнала, интенсивность АЭ. Их числовые значения могут изменяться в очень широких пределах. Это связано как с особенностью структуры различных материалов и режимов их нагружения, так и с параметрами аппаратуры.

Возможность применения явления акустической эмиссии к регистрации потери устойчивости ограничивается следующими особенностями. Сигналы АЭ имеют локальный характер и быстро затухают по мере удаления от места возникновения. Интенсивность АЭ существенно зависит от скорости нагружения. Излучение сигналов АЭ происходит только в том случае, когда дефекты развиваются. Параметры АЭ связаны с деформациями сложной зависимостью, что затрудняет создание измерительной аппаратуры.

Возможен и другой подход к использованию ультразвуковых колебаний. Известен способ определения критического усилия потери устойчивости элемента конструкции [98], который заключается в том, что с целью определения начальных стадий потери устойчивости образца в нем в процессе нагружения возбуждаются посредством излучателя высокочастотные ультразвуковые колебания и пьезоэлектрическим приемником регистрируется зависимость их амплитуды от внешней нагрузки. В докритическом состоянии эта зависимость близка к линейной [59]. О начале местного выпучивания или возникновении трещины судят по резкому нарушению этой зависимости (рис. 5.12).

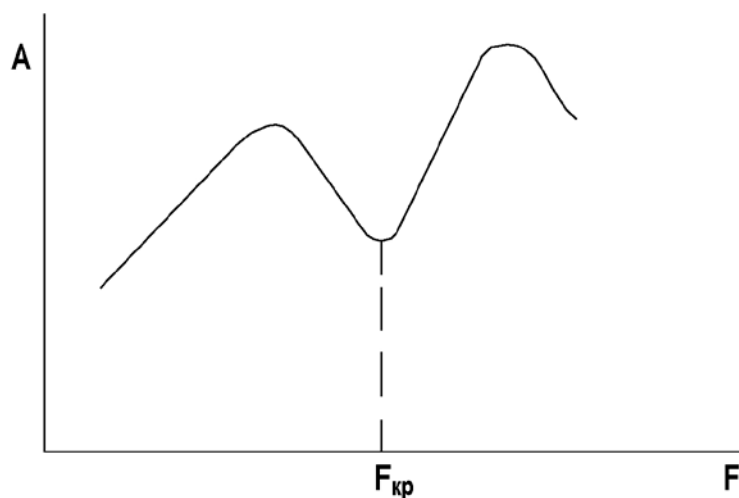


Рис. 5.12. Зависимость амплитуды УЗК от нагрузки при потере устойчивости

Этот способ был реализован специальным устройством [104], которое в настоящей работе названо ультразвуковой системой контроля состояния изделия.

УСКСИ с одной стороны, содержит (см. рис.5.13) возбуждатель 1 акустических волн, включающий в себя ультразвуковой генератор 2, к которому подключен преобразователь 3, установленный на пьезоэлектрической подложке, прикрепленной (приклеенной) к испытуемой конструкции 4. С другой стороны, на конструкцию на расстоянии 30...150 см, от генератора, выбираемом в зависимости от акустического сопротивления материала изделия и мощности генератора, крепится приемник 5 акустических волн с тремя пьезоэлементами 6...8, удаленными друг от друга на расстояние, не равное половине длины волны, с целью непопадания хотя бы одного из трех чувствительных элементов в зону впадины стоячей акустической волны, распространяющейся в конструкции 4. Система оснащена последовательно соединенными трехканальным усилителем 9, детектором 10, сумматором 11 и блоком 12 регистрации экстремума выходного сигнала. Пьезоэлементы 6...8 приемника 5 электрически связаны с входами соответствующих каналов усилителя 9. Блок 13 служит для управления механизмом нагружения конструкции.

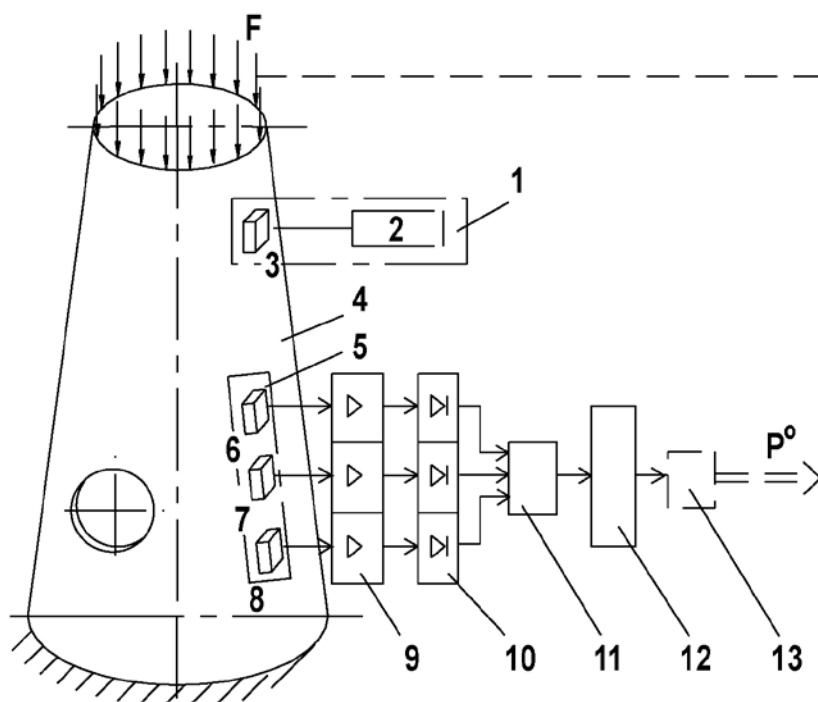


Рис. 5.13. Схема ультразвуковой системы контроля состояния изделия

УСКСИ работает следующим образом. При нагружении конструкции 4 силой F в начальных стадиях потери устойчивости, т.е. при критических значениях силы F , пьезоэлементы 6...8 приемника 5 фиксируют экстремальное значение акустического сигнала и передают его через усилитель 9, детектор 10, сумматор 11 на блок 12 регистрации экстремума выходного сигнала, который при перемене знака производной по времени функции сигнала сумматора выдает управляющий сигнал на выключение блока 13, управляющего системой нагружения конструкции силой F . Величина нагрузки F в момент срабатывания блока регистрации 12 является критической.

Макетный образец УСКСИ был отработан на широком ряде образцов: стержней, подкрепленных пластин, гладких оболочек. Он использовался при испытаниях реальных оболочковых конструкций из алюминиевых сплавов и композиционных материалов.

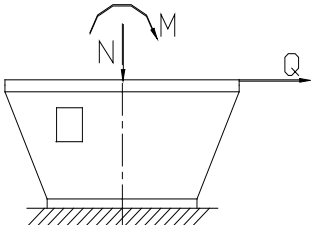
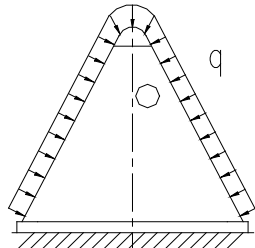
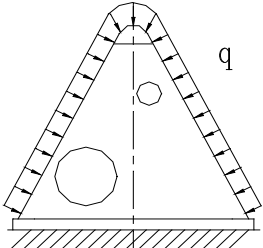
Некоторые результаты прогноза устойчивости конструктивных элементов КА F/S - методом и комбинированным методом представлены в работах [53,99,102].

В таблице 5.3 показан внешний вид и характер нагружения реальных конструкций, данные прогноза критических нагрузок которых подсистемой ПРОГНОЗ-К были проверены испытаниями до разрушения.

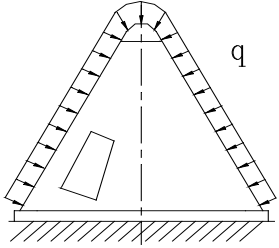
Здесь F - нагрузка при которой осуществлялся прогноз, $F_{кр}^{\partial}$ - действительная критическая (разрушающая) нагрузка, F_p - расчетная нагрузка исчерпания несущей способности конструкции, $F_{кр}^*$ - прогнозируемая критическая нагрузка.

Приведенные результаты использования системы ПРОГНОЗ-К свидетельствуют о возможности ее успешного применения при обработке статической прочности конструкций космических аппаратов.

Таблица 5.3

№ п/п	Схема нагружения	Количество ТР, их расположение	Жесткостной параметр D	$F_{кр} / F_p$
1	2	3	4	5
1		87 на полках стрингеров, прилегающих к обшивке	$D = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{np}}$ $\varepsilon_{np} = 0,375\%$	1,3 разрушение хлопком
2	 <p>Внешнее давление</p>	125 (21 розетка) на обшивке у люков, вдоль шпангоутов и стрингеров	$D = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{np}}$ $\varepsilon_{np} = 0,375\%$	1,19 перестройка волно- образования, 2,29 разрушение хлопком
3	 <p>Внешнее давление</p>	129 (22 розетки) на внешней оболочке и в зонах люков	$D = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{np}}$ $\varepsilon_i - \text{интенсив-}$ ность дефор- $\text{мации по } i\text{-ой}$ розетке $\varepsilon_{np} = 0,56\%$	1,56 разрушение хлопком

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3	4	5
4	 <p>Внешнее давление</p>	10 двойных и 20 тройных розеток в зонах шпангоутов друг под другом	$D = \frac{\varepsilon_{\alpha}}{\varepsilon_{np}} + \frac{\varepsilon_{\beta}}{\varepsilon_{np}}$ $\varepsilon_{np} = 0,56\%$ <p>α и β -кольцевое и меридио-нальное направления</p>	1,30 разрушение хлопком
5	 <p>Внешнее давление</p>	36 попарно друг под другом в кольцевом и меридио-нальном направлениях	$D = \frac{\varepsilon_{\alpha}}{\varepsilon_{\alpha np}} + \frac{\varepsilon_{\beta}}{\varepsilon_{\beta np}}$ $\varepsilon_{\alpha np} = 0,45\%$ $\varepsilon_{\beta np} = 0,25\%$ <p>по образцам-свидетелям</p>	0,90 образование трещины на внутреннем несущем слое 1,48 разрушение хлопком

ГЛАВА 8. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ КА

ГЛАВА 6. ВИБРАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

6.1. Методики и структурные схемы вибрационных испытаний КА

Как уже было сказано выше, космический аппарат на всех этапах полета в той или иной мере подвержен вибрации, которая является результатом внешних воздействий, носящих случайный характер. Реализация реальных условий эксплуатации в лабораторных условиях является сложной в теоретическом и техническом плане задачей, которая решается различными методами. Эти методы определяют следующие виды вибрационных^{*)} испытаний, отличающихся друг от друга величиной и характером внешних воздействий на испытуемое изделие [38,48,58]:

- испытания на фиксированных режимах гармонической вибрации;
- испытания на гармоническую вибрацию методом качающейся частоты;
- испытания на полигармонические вибрации;
- испытания на широкополосную случайную вибрацию;
- испытания на узкополосную случайную вибрацию;

^{*)} В различных источниках этот тип испытаний называется «вибродинамически-ми» или «динамическими» (ДИ) испытаниями.

- испытания на реальные вибрации;
- многокомпонентные вибрационные испытания;
- ускоренные испытания на вибропрочность и виброустойчивость;
- вибрационные испытания до разрушения конструкции.

Задача стендовых вибрационных испытаний, с точки зрения аппаратурного воспроизведения реальной вибрации, заключается в обеспечении требуемого вида колебательно-го процесса с минимальной погрешностью.

Требования к параметрам вибрации, воспроизводимой в ходе ДИ должны соответствовать рекомендациям международной электротехнической комиссии (МЭК), на основании которых строятся нормы прочности на отработку КА.

Приведем основные из названных требований:

Диапазон частот, Гц	5...5000
Допуск на частоту, Гц	$\pm 1\%$ до 50 Гц $\pm 2\%$ свыше 50 Гц
Диапазон ускорений, m/s^2	10...500
Погрешность воспроизведения и поддержания ускорения в контрольной точке, %	± 10
Погрешность воспроизведения и поддержания перемещения в контрольной точке, %	± 15 .

Эти параметры должны устанавливаться в контрольной точке или точках, которые указываются в программе испытаний.

Обычно контрольную точку выбирают в одном из следующих мест:

- на столе вибратора рядом с одной из точек крепления изделия, если последние крепят непосредственно на столе;
- на крепежном приспособлении, если изделие крепят на приспособлении;
- рядом с точкой крепления амортизатора, если изделие крепят на собственных амортизаторах.

Общепринято устанавливать контрольный виброизмерительный преобразователь (ВИП) на крепежном приспособлении в непосредственной близости от точки крепления изделия. Если же изделие крепится в нескольких точках, то часто бывает необходимо устанавливать контрольные ВИП вблизи каждой точки крепления. При этом поддерживается заданный уровень вибрации равным среднему значению амплитуд колебаний во всех точках крепления, либо максимальному из них.

Нормы стендовых испытаний должны соответствовать параметрам динамических нагрузок, полученным в реальных условиях эксплуатации изделия. Вибрационные нагрузки космического аппарата зависят от типа ракеты-носителя, условий запуска (наземный, подводный, повышенные ветровые нагрузки), жесткостных характеристик аппарата, носителя, узла стыковки, траектории полета и ряда других факторов.

Величины этих нагрузок регистрируются и передаются в центр управления полетом телеметрическими системами, накапливается статистика, формируются прототипы, устанавливаются нормы прочности. При отсутствии таких данных используются завышенные нормы, полученные расчетно-теоретическим путем.

Стендовые испытания разделяют на два класса: испытания на вибропрочность и испытания на виброустойчивость. Цели и задачи первого класса приведены в таблице 1.1. Испытания же второго класса, как правило, проводятся в меньшем объеме, чем первого, однако, испытываемая в составе КА или отдельных его сборок аппаратура должна быть во включенном состоянии. При этих испытаниях к аппаратуре подключаются измерительные приборы, с помощью которых контролируется ее работоспособность и изменение параметров при воздействии на объект испытаний вибрации с заданной перегрузкой в заданном диапазоне частот.

Прежде, чем рассмотреть структурные схемы реализации всех вышеперечисленных видов виброиспытаний, отметим следующее.

До воспроизведения той или иной программы испытаний в заданном диапазоне частот определяют и регистрируют их резонансные^{*)} значения. После нахождения спектра резонансных частот, исходя из требований к испытаниям, назначают одну или несколько нерезонансных частот, при которых производят контрольные приемо-сдаточные испытания конструкции или аппаратуры на воздействие ускорений различного уровня и длительности. Эти испытания проводят на одной или нескольких фиксированных частотах с основной целью определения производственных дефектов изготовления изделия.

Для проведения вибрационных испытаний изделия или аппаратуру закрепляют на столе вибростенда или крепежной оснастке таким образом, чтобы вибрация передавалась с минимальными потерями. Способы закрепления испытуемого объекта выбираются, исходя из условий эксплуатации и технических возможностей вибростенда. Агрегаты и сборки КА, как правило, закрепляют так, чтобы виброперегрузка поочередно направлялась по трем плоскостям стабилизации изделия.

Испытания на фиксированных режимах гармонической вибрации.

Структурная схема испытаний на фиксированных режимах вибрации (фиксированных частотах) представлена на рис. 6.1.

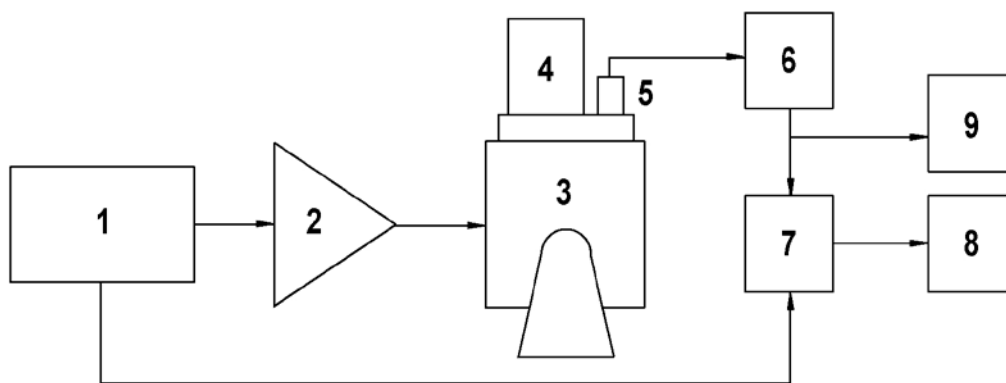


Рис. 6.1. Структурная схема испытаний на фиксированных частотах гармонической вибрации:

1 - задающий генератор; 2 – усилитель мощности; 3 - вибратор; 4 - изделие; 5 - ВИП; 6 – согласующий усилитель; 7 - следящий фильтр; 8 - виброизмерительный прибор (самописец); 9 - магнитофон

Как правило, эти испытания проводятся при разомкнутой (без обратной связи) системе управления. Заданный диапазон частот разбивается на октавные^{*)} поддиапазоны, устанавливается шаг изменения частоты в поддиапазоне. В программе испытаний для каждой частоты указывается уровень перегрузки (g) и время воздействия.

^{*)} Резонансной (в первом приближении) принято считать частоту, на которой амплитуда колебаний превышает исходную величину более чем в два раза. При постановке задачи поиска физических резонансов волнового процесса главным условием его нахождения является сдвиг фазы сигнала на 180° .

^{*)} Октава - поддиапазоны двухкратного увеличения частоты. Обычно испытания КА и его сборок начинаются с частоты 2 Гц. В этом случае 1 октава 2...4 Гц, 2 октава 4...8 Гц и т.д.

При проведении испытаний этим методом выход на заданный режим производится ручной регулировкой уровня выходного сигнала, задающего генератора на определенной частоте до требуемого значения. Последнее выдерживается в течение программного времени в соответствии с нормами прочности.

Контроль заданного вибрационного параметра изделия (перемещения, скорости, ускорения) производится комплексом виброизмерительной аппаратуры, включающим в свой состав ВИП, согласующий усилитель (например, предусилитель заряда), управляемый генератором следящий фильтр, самописец. Параллельно самописцу, регистрирующему сигнал на частоте генератора, запись «грязного» сигнала ведется на магнитофон для его дальнейшей обработки аналоговыми или цифровыми средствами.

Испытания на гармоническую вибрацию методом качающейся частоты.

Структурная схема испытаний названным методом приведена на рис. 6.2.

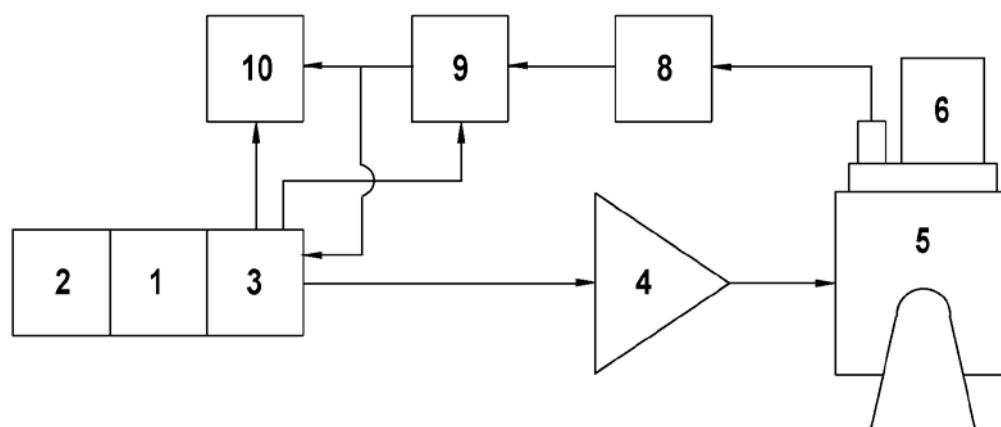


Рис. 6.2. Структурная схема испытаний на гармоническую вибрацию методом качающейся частоты:

1 - задающий генератор; 2 – блок качания частоты (БКЧ); 3 - автоматический регулятор уровня (АРУ); 4 - усилитель мощности; 5 - вибратор; 6 - изделие; 7 - ВИП; 8 - согласующий усилитель; 9 - следящий фильтр; 10 - самописец

Системы, реализующие принцип качания (сканирования) частоты, являются замкнутыми. Этот метод по существу - основной для определения собственных частот испытуемой конструкции и величин резонансных амплитуд.

При проведении испытаний этим методом частотой задающего генератора управляет блок качания частоты (БКЧ), который задает закон изменения частоты и время цикла качания. Чаще всего частота меняется по линейному и логарифмическому законам, а время качания составляет от нескольких секунд до десятков минут.

Автоматический регулятор уровня (АРУ), включенный в цепь обратной связи обеспечивает поддержание постоянного уровня ускорения, скорости или смещения на столе вибратора в заданном диапазоне частот. Как правило, испытания проводят на постоянном уровне смещений стола вибратора на частотах до 500 Гц, на более высоких частотах поддерживается постоянный уровень ускорения.

АРУ изменяет выходные напряжения генератора, а следовательно, и мощность колебаний на выходе усилителя мощности, воздействующего на подвижную катушку электродинамического вибратора. Необходимая скорость регулирования сигнала отрицательной обратной связи (скорость компрессии) обычно устанавливается в соответствии с ожидае-

мыми значениями добротности^{*)} конструкции и скорости сканирования частоты. Чем больше добротность, тем больше должна быть скорость компрессии. Однако во избежание больших нелинейных искажений скорость компрессии в то же время должна быть достаточно малой на низких частотах и, соответственно, большей на высоких частотах. В отечественных и многих зарубежных устройствах скорость компрессии изменяется ступенчато вручную или автоматически. В цепь обратной связи системы вводится следящий фильтр с целью обеспечения регулировки по основной гармонике на каждой частоте диапазона сканирования.

Испытания на гармоническую вибрацию методом качающейся частоты начинаются с предварительной настройки системы управления, в соответствии с которой генератор на средней частоте заданного частотного диапазона вводится в режим обратной связи на максимальной ее глубине. Виброизмерительный прибор должен при этом показать 0,1...0,5 заданного значения вибрационного параметра. Эта операция повторяется при частоте генератора, соответствующей нижней отметке заданного частотного диапазона. Далее, уменьшая глубину обратной связи, устанавливают заданное значение вибрационного параметра, а затем включают автомат развертки и проводят испытания во всем программном диапазоне частот.

Испытания на полигармонические вибрации.

Этот метод является промежуточным между выше рассмотренным и методом испытаний на широкополосную случайную вибрацию, предназначен для простейшего моделирования эксплуатационных вибраций путем суммирования гармонических колебаний различной частоты и уровня.

Структурные схемы двух модификаций метода приведены на рис. 6.3 и рис. 6.4.

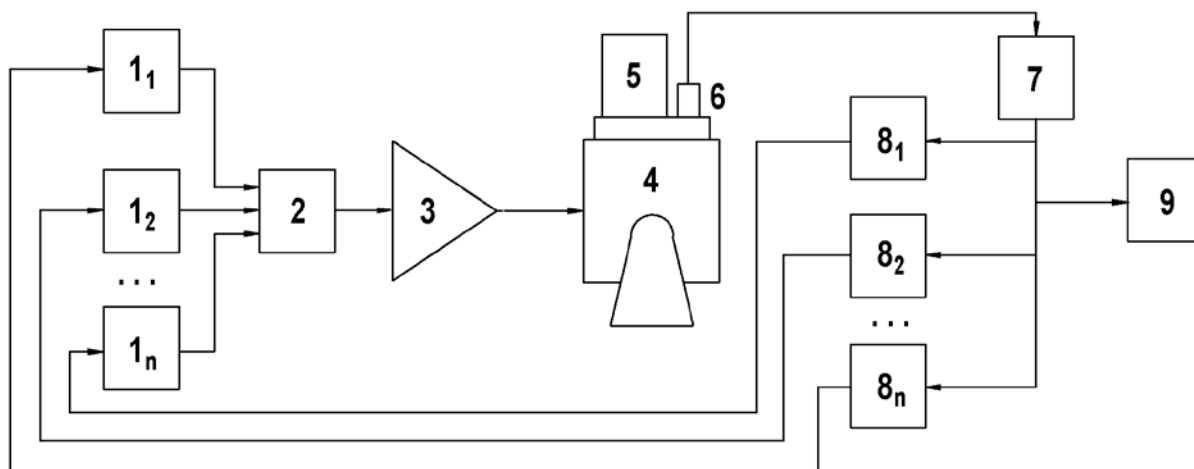


Рис. 6.3. Структурная схема воспроизведения полигармонической вибрации без подстройки по фазе:

- 1₁...1_n - управляющие генераторы синусоидальных сигналов;
- 2 - суммирующее устройство; 3 - усилитель мощности; 4 - вибратор;

^{*)} Добротность механической системы - величина, характеризующая сопротивление системы воздействию гармонической силы. Для систем с вязким трением она обратно пропорциональна удвоенному коэффициенту вязкого демпфирования, а для систем с диссипативной силой, пропорциональной перемещению - обратно пропорциональна коэффициенту механических потерь [109].

5 - изделие; 6 - ВИП; 7 - согласующий усилитель; $8_1...8_n$ - следящие фильтры;
9 - регистратор

Первая модификация метода (см. рис. 6.3) реализуется следующим образом. Производится спектральный анализ, записанный на магнитную ленту натурной вибрации. Полученные данные сводятся в таблицы, в которых указываются частоты гармоник и соответствующие им виброускорения в определенной точке изделия (стола вибратора) через заданные промежутки времени. В ходе испытаний сигналы соответствующих частот с генераторов $1_1...1_n$ через сумматор 2 поступают на вход усилителя мощности 3 вибростенда 4. Каждый генератор обеспечивает развертку частоты в своем частотном диапазоне независимо друг от друга. Сигналы с выходов управляющих генераторов суммируются и воздействуют через усилитель мощности на вибратор. Автоматическое управление режимом испытаний осуществляется отдельно каждым генератором с заданными частотами при помощи следящих фильтров $8_1...8_n$. Суммарный сигнал в подобных системах получается нестационарным по форме из-за непрерывного изменения сдвига фаз между составляющими. Этот недостаток устраняется во второй модификации метода путем включения в электрическую цепь каждого генератора фазосдвигающего устройства. В этом случае (см. рис. 6.4) сигналы с выхода задающих генераторов $1_1...1_n$ через фазовращатель $2_1...2_n$ поступают на сумматор 3. Суммарное напряжение подается на усилитель мощности 4, а затем на вибратор 5. Настройка на необходимый режим работы осуществляется последовательно по амплитуде и фазе каждой составляющей вручную. Контроль задания режима производится виброизмерительной и регистрирующей аппаратурой. Описанный метод достаточно хорошо моделирует условия эксплуатации изделия, прост, однако, требует достаточно много времени на настройку аппаратуры при выходе на заданный режим испытаний.

Испытания на широкополосную случайную вибрацию.

Максимальное приближение к реально существующим условиям работы устройств автоматики КА обеспечивают испытания на широкополосную случайную вибрацию. Этот вид испытаний дает возможность сократить время их проведения за счет ужесточения условий, а именно: при случайной широкополосной вибрации все резонансные частоты испытуемого изделия возбуждаются одновременно и возможно выявление их взаимного влияния.

В лабораторных условиях методом испытаний на широкополосную случайную вибрацию не копируются натурные вибрации, а воспроизводятся те числовые характеристики вибрационного режима, которые влияют на надежность испытуемого изделия. Эти характеристики обычно назначаются по результатам натурных испытаний прототипов.

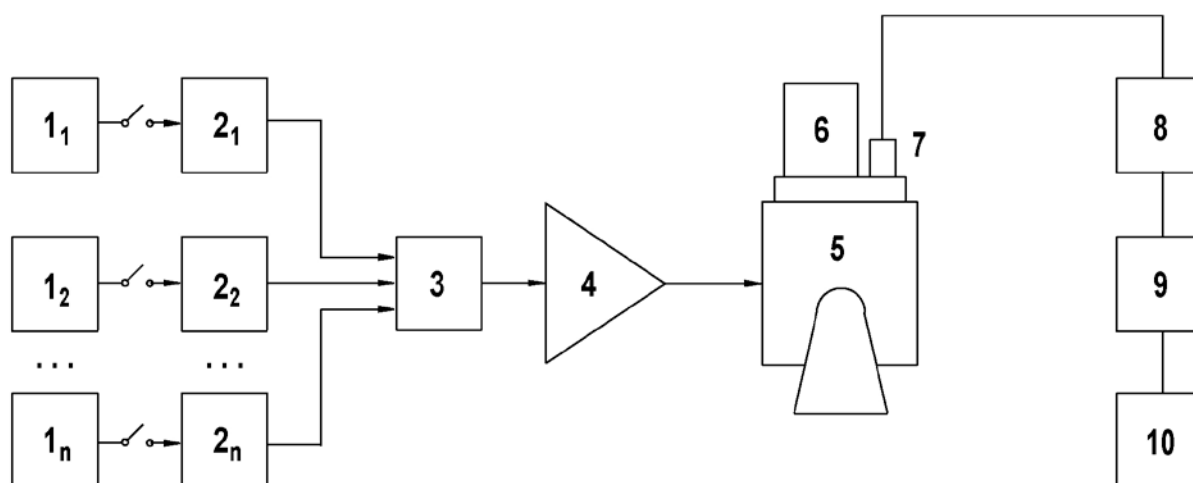


Рис. 6.4. Структурная схема воспроизведения полигармонической вибрации с настройкой амплитуды и фазы каждой составляющей:
 $1_1...1_n$ - генераторы синусоидальных сигналов; $2_1...2_n$ - фазосдвигающие устройства; 3 - суммирующее устройство; 4 - усилитель мощности; 5 - вибратор; 6 - изделие; 7 - ВИП; 8 - согласующий усилитель; 9 - виброизмерительный прибор; 10 - регистратор

За критерий подобия обычно принимают спектральную плотность вибрационных ускорений или перегрузок, так как вероятность поломки испытуемого изделия возрастает с повышением спектральной плотности вибраций. Программа испытаний в этом методе задается в виде графика, по оси ординат которого откладывают значения спектральной плотности G , измеренные в $(\text{м/с}^2)/\text{Гц}$, а по оси абсцисс полосы частот (Гц), в которых проводили эти измерения. Эта программа воспроизводится теми же электродинамическими стендами, которые используются при испытаниях на гармоническую вибрацию, но оснащенные дополнительной электронной задающей аппаратурой. Программный уровень спектральной плотности заданного диапазона частот в контрольной точке изделия обеспечивается с помощью формирователей энергетического спектра, которые, в общем случае, представляют собой источник широкополосного случайного сигнала или белого шума и набор регулируемых полосовых фильтров.

Практически используются аналоговые и цифровые системы управления.

Структурная схема испытаний на широкополосную случайную вибрацию с аналоговой системой управления приведена на рис. 6.5.

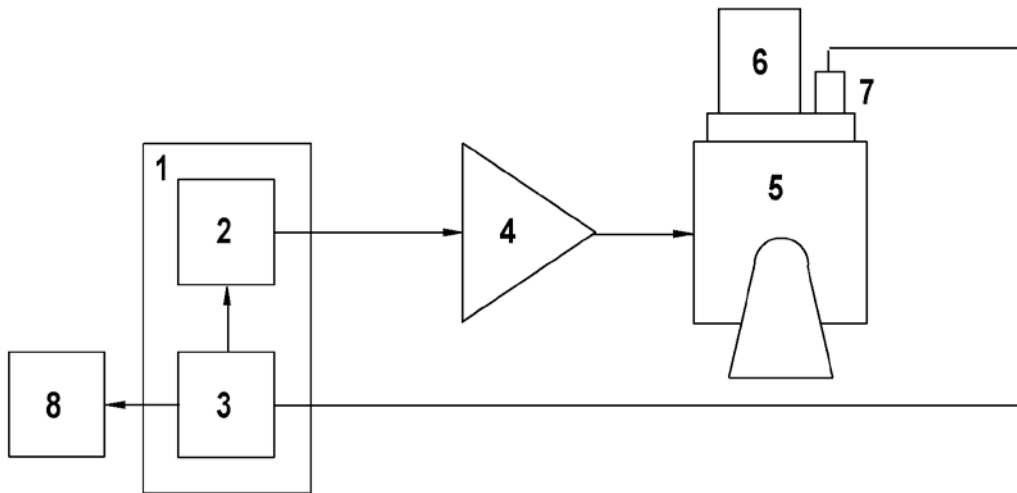


Рис. 6.5. Структурная схема испытаний на широкополосную случайную вибрацию с аналоговой системой управления:

1 - анализатор-выравниватель (система); 2 - выравниватель; 3 - анализатор; 4 - усилитель мощности; 5 - вибратор; 6 - испытуемое изделие; 7 - ВИП; 8 - регистратор

Система, реализующая методику испытаний, работает следующим образом: широкополосный случайный сигнал с равномерной спектральной плотностью в заданном диапазоне частот с генератора шума поступает на блок формирующих фильтров и разделяется на n смежных частотных полос. На выходе формирующих фильтров имеются усилители с переменным коэффициентом усиления. Сигнал с выходов усилителей через сумматор и

фильтр низких частот, а также предварительный усилитель поступает на усилитель мощности 4 и далее на вибратор 5. Устройство, включающее генератор шума, формирующие фильтры, усилители с переменным коэффициентом усиления, сумматор и фильтр низких частот, является выравнителем 2 аналоговой системы управления. Сигнал с выхода вибропреобразователя 7, установленного на столе вибратора изделия, через согласующий и предварительный усилители поступает на фильтры анализатора, идентичные фильтрам выравнителя. С каждого фильтра анализатора сигнала через детекторы попадают на усилитель обратной связи. С него сигнал переменного тока проходит через потенциометры ручного регулирования каждого канала на усилители автоматического регулятора усиления. Устройство, включающее предварительный усилитель, фильтры анализатора, усилители обратной связи, детекторы является анализатором 3. Выравнитель 2 и анализатор 3 на рис. 6.5 условно объединены в систему 1 управления испытаниями. В ручном режиме ее работы цепь обратной связи, подключающая АРУ, отсутствует. Необходимый уровень вибрации на испытуемом изделии формируется вручную.

Измерение спектральной плотности виброускорения в таких системах определяется путем измерения среднего значения дисперсии в узкой полосе частот. Для этого сигнал пропускают через узкополосный (формирующий) фильтр, возводят в квадрат (детектируют) и интегрируют (усредняют).

Отметим, что практика использования метода испытаний на широкополосную случайную вибрацию выявила следующие его особенности:

а) необходим итерационный подход к настройке всей системы вследствие реальной возможности перегрузки изделия;

б) необходим значительный запас мощности силового виброоборудования для устранения влияния динамических характеристик самого испытуемого изделия, в особенности, при испытаниях изделий значительной массы (свыше 1000 кг);

в) недостаточная мощность вибрационных стендов при испытаниях крупногабаритных конструкций на широкополосную случайную вибрацию приводит к необходимости разбиения заданного частотного диапазона на полосы, что существенно увеличивает время испытаний.

В реальных условиях на конструкцию КА воздействует векторный вибрационный процесс, компонентами которого являются вибрации в трех направлениях. Трехмерная случайная вибрация, как правило, реализуется цифровыми системами управления.

На рис. 6.6 приведена структурная схема цифровой системы управления трехмерной широкополосной случайной вибрацией.

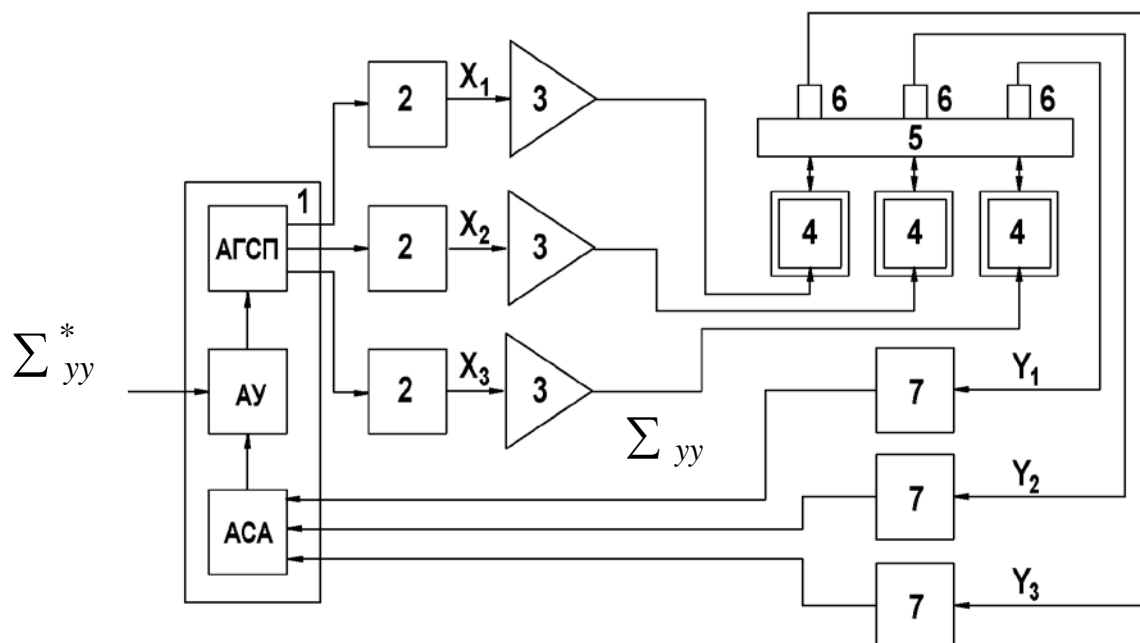


Рис. 6.6. Структурная схема цифровой системы управления трехмерной случайной вибрацией:

- 1 - управляющая ЭВМ; 2 - цифро-аналоговый преобразователь;
 3 - усилители мощности; 4 - вибраторы; 5 - испытуемое изделие; 6- задающие ВИП; 7 - аналого-цифровые преобразователи

Компоненты векторного процесса (x_1, x_2, x_3) задаются с помощью алгоритма интегрирования случайного процесса (АИСП) с управляемыми спектральными характеристиками. Цифроаналоговые преобразователи 2 превращают реализации дискретных цифровых случайных процессов x_1, x_2, x_3 , заданных ЭВМ, в непрерывные, возбуждающие колебания в испытуемом изделии 5 с помощью усилителей мощности 3 и вибраторов 4. На выходах датчиков 6 появляются реакции изделия y_1, y_2, y_3 , которые преобразуются аналого-цифровыми преобразователями в коды ЭВМ и поступают в память машины 1. Массивы чисел, представляющие собой реализацию выходного векторного случайного процесса y_1, y_2, y_3 , подвергаются спектральному анализу. Алгоритм спектрального анализа (АСА) вычисляет оценки собственных и взаимных спектров, являющихся элементами спектральной матрицы векторного случайного процесса. Алгоритм управления (АУ) определяет рассогласование между фактическими \sum_{yy} и заданными \sum_{yy}^* оценками элементов спектральной матрицы, на основании чего рассчитывают корректирующее воздействие сигнала для алгоритма АИСП. Результатом работы цифровой системы является скорректированный спектр входного воздействия, который запоминается в памяти машины и также может быть выведен на магнитную ленту или дисплей по команде оператора. При работе в режиме испытаний по полученному спектру генерируется случайный процесс, который выдается на испытуемый объект в течение необходимого промежутка времени.

Практическая реализация трехмерной случайной вибрации представляет собой сложную техническую задачу из-за необходимости передачи линейных колебаний по каждому направлению на изделие. Такие работы обычно проводятся с небольшими узлами и агрегатами. С уровня частот 18...20 Гц и выше двумя вибраторами и выставлением заданного (расчетного) положения изделия в пространстве.

Одним из характерных примеров цифровой системы управления широкополосной случайной вибрации является система DVC-500 (Дерритрон, Великобритания), которая рассмотрена в разделе 6.4.

Испытания на узкополосную случайную вибрацию.

Высокая стоимость оборудования для реализации испытаний на широкополосную случайную вибрацию привела к разработке других методов виброиспытаний, обеспечивающих условия нагружения, близкие к реальным, эксплуатационным.

Так, известен метод, основанный на принципе замены широкополосного случайного возбуждения с низким уровнем спектральной плотности ускорений более интенсивным узкополосным возбуждением с медленной перестройкой одного полосового фильтра по частоте. Метод требует выполнения условия, по которому спектральная плотность ускорения узкополосной случайной вибрации сосредотачивается в сравнительно узкой полосе

частот $\Delta f = f_2 - f_1$, около средней частоты полосы $f_0 = \frac{(f_2 - f_1)}{2}$, при этом

$\frac{\Delta f}{f_1} \leq 1$. Для каждого резонанса изделия механические напряжения пропорциональны ус-

корению соответствующей массы. Поэтому за критерий замены одного испытательного сигнала другим принимается идентичность распределения пиков вибрационного ускорения испытуемого изделия при узкополосных и широкополосных испытаниях. Узкополосная развертка позволяет сократить время испытаний при сохранении числа пиков ускорения по каждому уровню равным получаемому при широкополосном возбуждении.

Типовой график испытаний на узкополосную случайную вибрацию представлен на рис. 6.7, а структурная схема этих испытаний - на рис. 6.8.

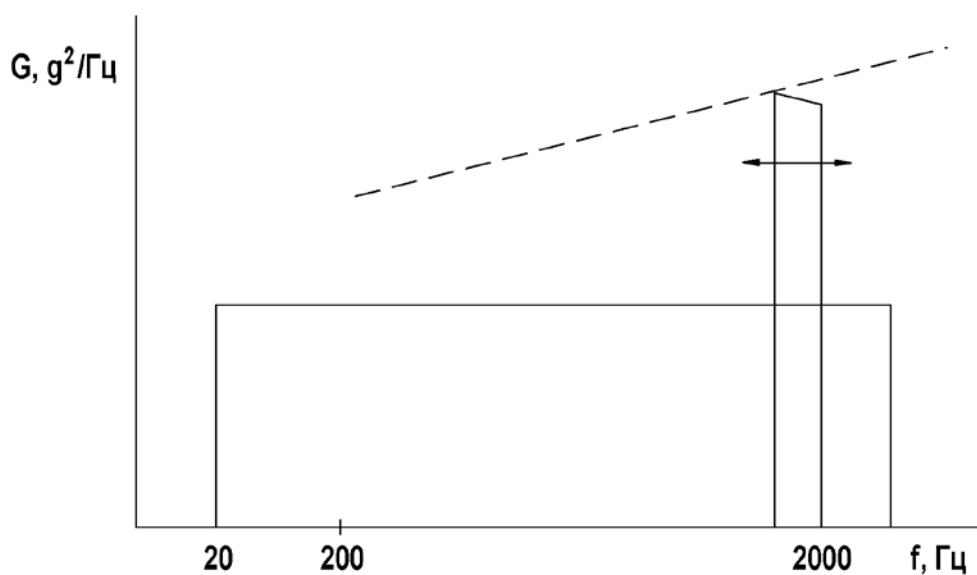


Рис. 6.7. График испытаний на узкополосную случайную вибрацию

Согласно схеме случайное напряжение с нормальным законом распределения, выдаваемое генератором шума 1, проходит через полосовой фильтр 2, который последовательно вырезает полосу спектра. Затем случайный процесс через полосовой избирательный усилитель 3, имеющий АРУ, включенный в цепь обратной связи, а также выполняющий

роль фильтра, через усилитель мощности и электродинамический вибратор 5 воспроизводится в контрольной точке изделия 6.

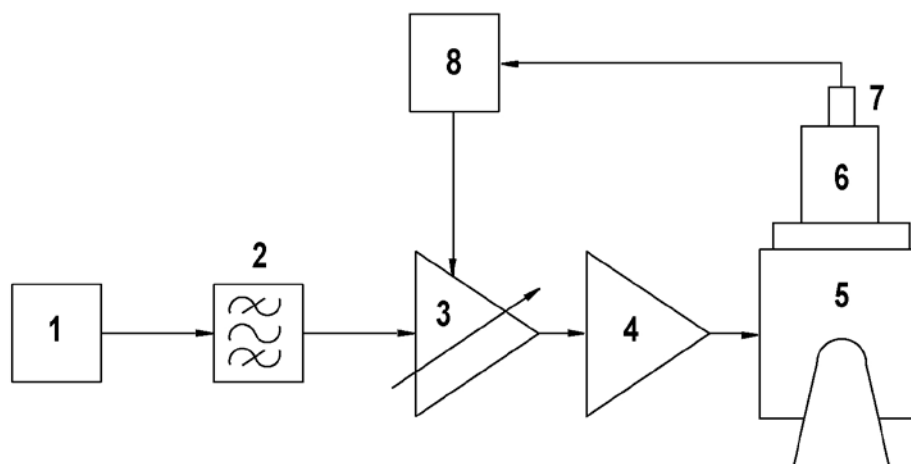


Рис. 6.8. Структурная схема испытаний на узкополосную случайную вибрацию:

1 - генератор шума; 2 - полосовой фильтр; 3 - усилитель с АРУ; 4 - усилитель мощности; 5 - вибратор; 6 - изделие; 7 - ВИП; 8 - виброизмерительная аппаратура

Схема АРУ предназначена для поддержания постоянного значения градиента ускорения на изделии при частотной развертке узкой полосы случайных вибраций.

Описанный метод реализуется достаточно простой аппаратурой, обеспечивает малое время подготовки к испытаниям и быстрый выход на режим.

Испытания на реальные вибрации.

При испытаниях на случайную широкополосную вибрацию реализуется только стационарный процесс или медленное изменение его параметров. Реальный же (натурный) процесс не является стационарным и на отдельных временных интервалах его характеристики могут меняться очень быстро, вследствие чего автоматическая система управления виброиспытаниями не может обеспечить необходимую глубину отрицательной обратной связи без нарушения ее устойчивости. Поэтому для сложных и ответственных устройств автоматики, узлов и агрегатов КА применяют дополнительный вид испытаний на имитацию натуральных вибраций. Этот вид испытаний используется для анализа аварийных ситуаций, возникших при эксплуатации изделия, а также для оценки запасов его прочности и виброустойчивости.

Метод реализуется структурной схемой, приведенной на рис. 6.9., и основан на коррекции частотных характеристик динамической системы, разомкнутой по задающему сигналу. Как правило, применяются корректирующие устройства и методика, аналогичные используемым при проведении испытаний на широкополосную случайную вибрацию.

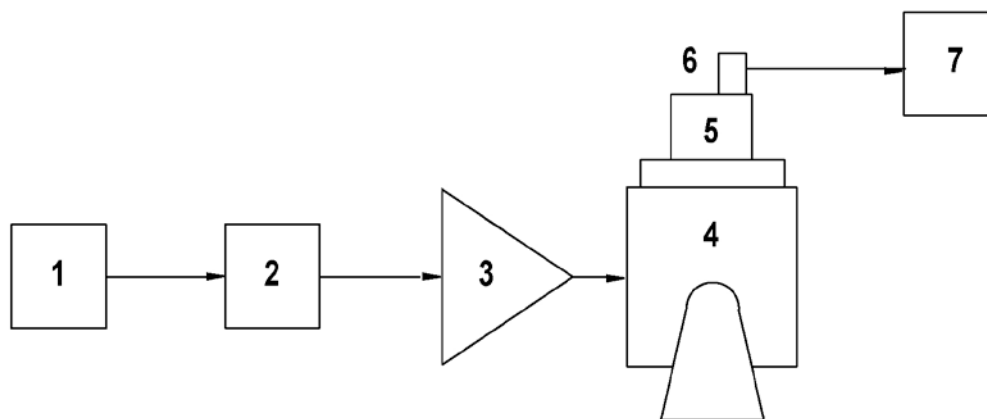


Рис. 6.9. Структурная схема испытаний на реальные вибрации:
 1 - магнитофон; 2 - корректирующее устройство (блок входных фильтров); 3 - усилитель мощности; 4 - вибратор; 5 - изделие; 6 - ВИП; 7 - анализирующее и регистрирующее устройство

Цель коррекции - максимальное приближение к единице передаточной функции динамической системы вибрационного тракта «вибратор-оснастка-изделие» в заданном частотном диапазоне. По окончании коррекции воспроизводится запись натурной вибрации в реальном масштабе времени и проверяется работоспособность испытуемого изделия.

Идентификация динамических характеристик вибрационного тракта проводится ЭВМ с помощью стандартных алгоритмов прямого и обратного преобразования Фурье, либо по другим специальным алгоритмам. После идентификации производятся расчеты входного сигнала (цифровая коррекция), в результате чего он должен быть равен требуемому с заданной точностью.

Многокомпонентные вибрационные испытания.

Это вид испытаний предназначен для глубоких исследований сложных пространственно нагруженных конструкций (чаще приборов, электронных систем). Схема таких испытаний была рассмотрена выше (см. рис. 6.6). Можно отметить, что для этих целей созданы трехкомпонентные вибростенды. Они весьма дороги. Широкого распространения этот вид виброиспытаний не нашел.

Ускоренные испытания на вибропрочность и виброустойчивость.

Этот вид испытаний представляет интерес, прежде всего, с точки зрения своей высокой экономической эффективности вследствие возможности значительного сокращения времени испытаний при сохранении качественных характеристик проверки изделия на вибропрочность и виброустойчивость. Наиболее распространен при отработке КА метод качающейся частоты при повышенных ускорениях. Часто применяется также подход, при котором испытания проводятся в области резонансных частот с пересчетом общего программного времени воздействия, исходя из условия отказа от возбуждения колебаний в октавных диапазонах более низких, чем резонансный. Одним из главных критериев вибропрочности конструкции является допустимое время выдержки его на резонансной частоте при заданной перегрузке.

Вибрационные испытания до разрушения конструкции.

Для определения способности изделий противостоять разрушающему действию вибрации проводят испытания на вибропрочность при длительном воздействии вибрационных нагрузок одним из выше рассмотренных методов. Особую ценность в этом плане представляют испытания на повреждающую нагрузку, при которой изделие или его элементы доводятся до разрушения. По результатам этих испытаний строят зависимости по-

вреждающего воздействия (в единицах ускорения м/с^2) от частоты, которые называют кривыми повреждения. С помощью них можно выявить конструктивные недостатки отдельных элементов изделия, определить их резонансные частоты и оценить стойкость к воздействию вибрации.

Путем совмещения кривых повреждения деталей можно получить результирующую кривую, характеризующую вибропрочность и виброустойчивость устройства в целом.

6.2. Классификация силового виброоборудования

Под термином «силовое виброоборудование» обобщим все средства возбуждения знакопеременных нагрузок, применяемые для отработки электронно-механических систем, в том числе и аэрокосмической техники.

По способу создания механических колебаний различают следующие типы силовозбудителей: гидравлические, пневматические, центробежные, кривошипные, пружинные, весовые, компрессионные, электродинамические, электромагнитные, магнитострикционные, пьезоэлектрические, термические.

Основными параметрами силовозбудителей являются: развиваемые усилия, возбуждаемые перемещения, диапазон частот возбуждения, значения собственных резонансных частот силовозбудителя.

К практически важным характеристикам силовозбудителя (вибратора) относятся также: надежность, удельная мощность (т.е. мощность, отнесенная к единице веса возбудителя); к.п.д.; стабильность характеристик; удобство перенастройки развиваемых нагрузок без остановки; возможность независимой настройки амплитуд и частот нагрузок; уровень паразитных шумов, сопровождающих работу возбудителя; степень универсальности применения, определяемая диапазоном развиваемых усилий, перемещений, частот и возможностью использования для испытаний разнообразных конструкций; стоимость; габариты и вес.

Для облегчения выбора типа силовозбудителя в таблице 6.1 [48] приведены ориентировочные данные о предельных значениях усилий, перемещений и частоты возбуждения для наиболее распространенных типов силовозбудителей.

Силовые гидроцилиндры широко используются как при статических, повторно-статических, так и низкочастотных вибрационных испытаниях за счет таких достоинств, как: значительные развиваемые усилия при больших динамических ходах; широкий диапазон плавного изменения скорости нагружения; сочетание большой выходной мощности с малыми габаритами, удобство преобразования энергии потока жидкости в механическую энергию возвратно-поступательного движения без промежуточных кинематических элементов; сравнительно низкая стоимость.

Таблица 6.1

Тип силовозбудителя	Параметры		
	Максимальное усилие, Н	Частота возбуждения, Гц	Перемещение, мм
Гидравлические силовозбудители:			
силовые гидроцилиндры	1×10^6 и более	0...5	500 и более
гидропульсаторы	1×10^7 и более	5...50	30 ^{*)}
гидровибраторы	1×10^6 и более	0...1000	200 ^{*)}
Центробежные вибраторы	1×10^5	5...150	100 и более

Электродинамические возбудители	1×10^5	5...10000	15...25
Электромагнитные возбудители	1×10^5	0...10000	15...25
*) Соответствует низким частотам			

Помимо рассмотренного в разделе 4.2 гидравлического цилиндра двухстороннего силового действия в ряде случаев применимы гидроцилиндры одностороннего силового действия, в котором поршень совершает обратный ход под действием пружины или упругих сил нагружаемой конструкции. Для регулирования скорости движения штока цилиндра, которая определяется расходом жидкости, может быть применен дроссельный или объемный метод. При реализации первого скорость поршня регулируется изменением гидравлического сопротивления дросселя (золотника), меняющего количество жидкости, поступающей в гидроцилиндр от насоса постоянной производительности. Во втором методе управление гидроцилиндром осуществляется изменением производительности насоса.

Достоинством дроссельного метода управления являются: малое воздействие, необходимое для управления золотником; высокое быстродействие, обусловленное малым перемещением золотника; возможность одновременного питания нескольких силовых цилиндров с автономным управлением от одного насоса; простота конструкции используемых насосов постоянной производительности и золотников. Однако системы с таким управлением обладают сравнительно низким к.п.д. ($\eta \approx 0,3$), что обусловлено большими потерями энергии в золотнике.

Более высокий к.п.д. ($\eta \approx 0,5...0,8$) может быть достигнут при объемном методе управления. В качестве насосов регулируемой производительности при объемном управлении обычно используются роторные радиально-поршневые гидромашины, обладающие свойством обратимости, т.е. работающие как в насосном, так и в двигательном режимах. Свойство обратимости роторных гидромашин при возбуждении повторно-статических нагрузок позволяет использовать для нагружения энергию упругих сил деформированной испытываемой конструкции, освобождающуюся при разгрузке (принцип рекуперации). Недостатком метода является низкая, до 2 Гц, частота изменения нагрузки из-за инерционности маховикового механизма переключения режима работы гидромашин.

Гидропульсаторные силовозбудители способны развивать нагрузки низкой и средней частоты с амплитудой до нескольких десятков тысяч кН при небольших динамических ходах. Применяются в основном для испытаний жестких конструкций и образцов материалов. Схема простейшего вида гидропульсаторного силовозбудителя приведена на рис. 6.10.

Принцип работы гидропульсатора заключается в следующем. Плунжер 1 бесклапанного насоса 2 совершает возвратно-поступательное движение под действием кривошипного механизма 8, 9. При этом в замкнутой гидросистеме возникают пульсации давления, возбуждающие в рабочей полости силового гидроцилиндра 6 переменную нагрузку, постоянную составляющую которой создает многоплунжерный насос 7. В гидропульсаторах двустороннего действия, создающих симметричные и асимметричные циклы нагрузок, испытываемая конструкция 4 крепится верхним концом к станине испытательной установки, а нижним - к подвижной раме 5. Эта рама находится под действием двух сил: статической силы натяжения пружины 3, вызывающей растяжение испытываемой конструкции, и переменной по величине силы, развиваемой гидроцилиндром 6, которая производит ее сжатие. Знак результирующей нагрузки, воспринимаемой испытываемым изделием зависит от того,

какая из названных сил больше. Для получения циклических нагрузок разных знаков сила натяжения пружины должна быть установлена равной нижнему пределу знакопеременного цикла.

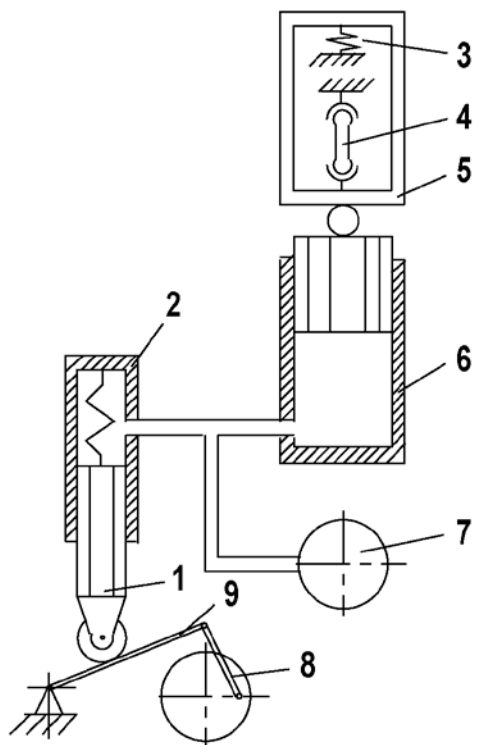


Рис. 6.10. Схема гидропульсаторного силового возбудителя:

1 - плунжер; 2 - корпус бесклапанного насоса; 3 - пружина растяжения конструкции; 4 - испытуемая конструкция; 5 - подвижная рама; 6 - силовой гидроцилиндр; 7 – много-плунжерный насос; 8 - кривошипный механизм; 9 - рычаг кривошипного механизма

Гидровибраторы основаны на использовании пульсирующего потока жидкости, направляемого в рабочие полости силового гидроцилиндра. Этот пульсирующий поток создается с помощью клапанов, золотников, заслонок, струйных трубок и других типов распределителей потока жидкости с гидромеханическим, электромеханическим, электромагнитным или иным видом управления.

Амплитуда и среднее значение переменной нагрузки зависят от пределов изменения расхода, а частота - от периодичности этого изменения.

На рис. 6.11 представлена схема наиболее часто используемого в практике испытаний электрогидравлического вибратора.

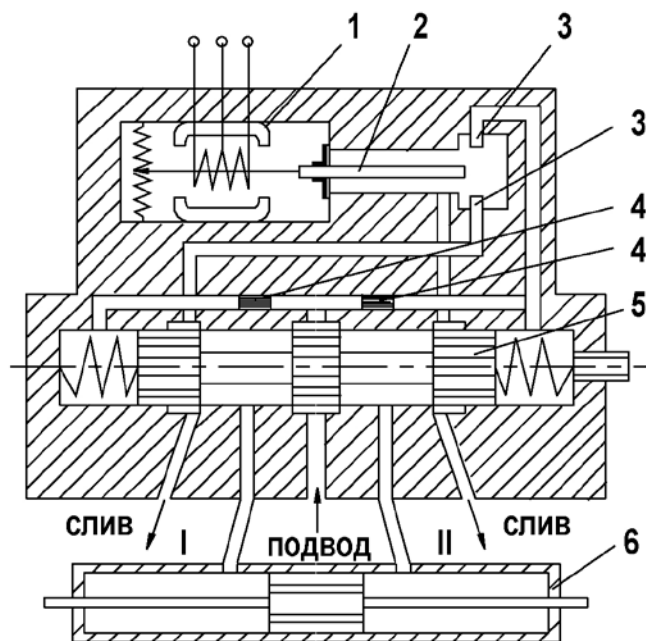


Рис. 6.11. Схема электрогидравлического вибратора:

1 - электромеханический вибратор; 2 - заслонка; 3, 3' - сопла; 4, 4' - дроссели; 5 - управляющий золотник; 6 - силовой цилиндр

В нем распределитель, периодически изменяющий направление потока жидкости в полостях I и II силового цилиндра 6 двухстороннего действия, возбуждается электромеханическим вибратором 1, представляющим собой поляризованный электромагнит с поворотным якорем. При протекании через обмотки последнего переменного тока величиной в несколько миллиампер якорь начинает колебаться с частотой тока управления. Закрепленная на якоре заслонка 2 воздействует на сопла 3 и 3', вызывая разбаланс в гидравлическом мостике, образованном этими соплами и двумя постоянными гидравлическими сопротивлениями, которыми служат дроссели 4 и 4'.

Перепад давления разбаланса используется для перемещения управляющего золотника 5. Частота и амплитуда возбуждаемой при этом переменной нагрузки определяется соответствующими параметрами тока управления. Коэффициент асимметрии цикла нагружения зависит от постоянной составляющей сигнала управления. Устройство типа сопло - заслонка 2 - 3 - 3' и золотник 5 представляет собой двухкаскадный гидроусилитель мощности сигнала управления, коэффициент усиления которого может быть весьма большим.

Применение *механических центробежных вибраторов* в экспериментальной обработке прочности АКА весьма ограничено вследствие сложности регулировки их параметров, поэтому об этом виде силовозбудителей приведем только общие сведения.

В зависимости от направленности возбуждаемых сил различают три типа механических центробежных вибраторов: ненаправленные, направленные и вибраторы для возбуждения крутильных колебаний.

Ненаправленный вибратор представляет собой вращающуюся массу, центр тяжести которой находится вне оси вращения. Направленный вибратор состоит из спаренных одинаковых ненаправленных вибраторов, имеющих общий привод и вращающихся в противоположных направлениях с одинаковой по величине скоростью. Вибратор для возбуждения крутильных колебаний состоит из двух одинаковых ненаправленных вибраторов с противоположно расположенными неуравновешенными массами, которые вращаются с

одинаковой скоростью в одном направлении и создают пару сил и, соответственно, крутящий момент на испытуемом изделии.

Частота возбуждаемых механическими вибраторами нагрузок определяется скоростью вращения неуравновешенных масс и регулируется путем изменения скорости приводного двигателя. Амплитуда нагрузки при постоянной скорости вращения регулируется либо изменением величины неуравновешенной массы, либо изменением расстояния центра тяжести неуравновешенной массы от оси вращения, либо одновременным действием обоих этих факторов.

Наиболее распространены вибраторы с барабанами стержневого типа, в которых величина возбуждаемой силы регулируется числом стержней, устанавливаемых в расположенных по периметру барабана отверстиях.

Электродинамические силовозбудители основаны на использовании механических сил, действующих на проводник, помещенный в постоянное магнитное поле, при протекании через него переменного тока.

Конструктивная схема электродинамического возбудителя (вибратора) приведена на рис. 6.12.

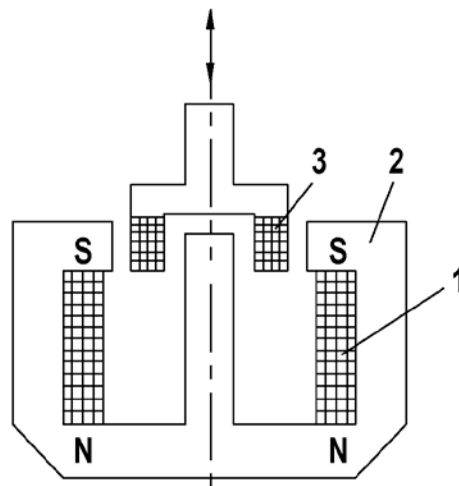


Рис. 6.12. Конструктивная схема электродинамического вибратора:

1 - обмотка подмагничивания; 2 - магнитопровод;

3 - подвижная рабочая катушка

При подключении электромагнита к источнику постоянного тока обмотка подмагничивания 1 создает в магнитопроводе 2 магнитный поток, постоянный по величине и направлению. В кольцевом зазоре магнитопровода помещается подвижная рабочая катушка 3. При пропускании через нее переменного тока возникает сила, изменяющаяся с частотой тока питания. Эта сила действует на катушку и на связанную с ней механически испытуемую конструкцию.

Амплитуда колебаний, возбуждаемых электродинамическим вибратором, нелинейно зависит от подводимой энергии и меняется с изменением частоты и нагрузки. Влияние частоты на амплитуду обусловлено зависимостью импеданса (полного электрического сопротивления Z) от частоты f . Типичный характер этой зависимости (при питании вибратора током с постоянной амплитудой, не зависящей от частоты) показан на рис. 6.13.

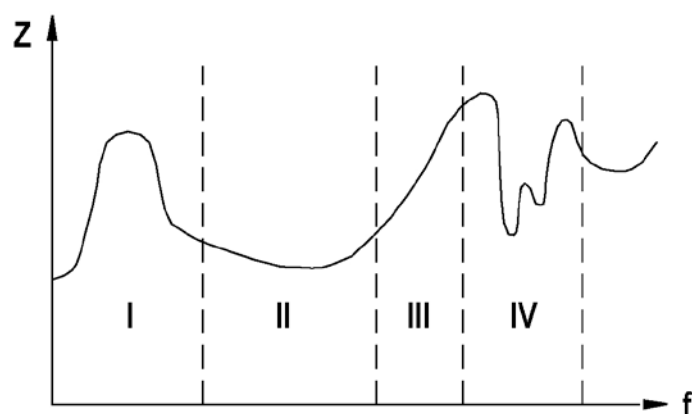


Рис. 6.13. Частотная зависимость импеданса электродинамического вибратора

В этой зависимости выделяют четыре области. Частотная зависимость импеданса в области I определяется основным током механических колебаний системы «вибратор-оснастка-испытываемый объект». Независимость импеданса от частоты в этой области может быть достигнута введением корректирующих обратных связей или электрических цепей, имеющих обратную частотную характеристику.

В области II импеданс практически не зависит от частоты. В области III отмечается увеличение импеданса по мере роста частоты за счет влияния индуктивности катушки. Корректировка частотной зависимости в этой области и расширение рабочего диапазона частот вибратора достигается введением дополнительной катушки, имеющей электромагнитную связь с основной рабочей катушкой. В области IV сказываются резонансные частоты отдельных узлов вибратора: корпуса, подвижной катушки, системы разгрузки и т. д. Расширение рабочего диапазона частот вибратора на эту область сопряжено с решением сложных конструкторских задач и сокращением мощности вибратора.

Электромагнитные силовозбудители основаны на использовании переменных сил, развиваемых электромагнитом при питании его обмотки переменным или пульсирующим током. При простоте изготовления и удобства регулировки частоты и амплитуды возбужденных нагрузок путем воздействия на частоту и амплитуду тока управления, эти силовозбудители имеют низкую удельную мощность и предназначены для создания сравнительно небольших нагрузок.

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

Пьезоэлектрические вибраторы используют свойства некоторых кристаллов (кварца, сегнетовой соли, титаната бария и т.д.) деформироваться под действием электрического поля.

Эти два типа вибраторов предназначены для испытаний небольших деталей и образцов материалов в режимах высоких (30 кГц и выше) частот с малыми нагрузками и перемещениями.

6.3. Вибрационные комплексы для обработки изделий РКТ

Вибрационные воздействия, воспринимаемые космическим аппаратом на всех стадиях полета, лежат в диапазоне от 0 до 20000 Гц с уровнем нагружения, обеспечивающим перегрузку до 30...50 g (неуправляемый спуск спускаемого аппарата). Технические средст-

ва, которые в лабораторных условиях могли бы обеспечить весь диапазон нагрузок, отсутствуют, поэтому в практике испытаний оборудование условно разделяется на системы, обеспечивающие низкочастотную вибрацию 0...200 Гц, высокочастотную вибрацию 200...3000 Гц и акустическое воздействие 20...20000 Гц при уровне звукового давления до 180 Дб. Реализацию последнего вида воздействий обычно выделяют в особый тип виброакустических или просто акустических испытаний (см. раздел 8.3).

Наиболее распространенным, обладающим большой мощностью, долговечностью и способностью регулирования параметров вибрации в широких пределах оборудованием для возбуждения низкочастотных вибраций являются *электрогидравлические вибрационные установки ЭГВУ*. Некоторые типы ЭГВУ, применяемые для отработки аэрокосмической техники приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2

Тип ЭГВУ	Частотный диапазон, Гц	Максимальная толкающая сила, кН	Максимальная амплитуда колебаний	Страна, фирма
ЭГВ-10-200	200	100	100	СССР
СИ6037-100-3	100	100	100	Россия
G-5315	60	150	100	Армавир ЗИМ
G-5410	200	250	200	Япония «Shinken»
PL-630K	250	630	100	США «MTS System» —«—

ЭГВУ представляет собой достаточно сложный комплекс технических средств, типовая блок-схема взаимодействия которых приведена на рис. 6.14.

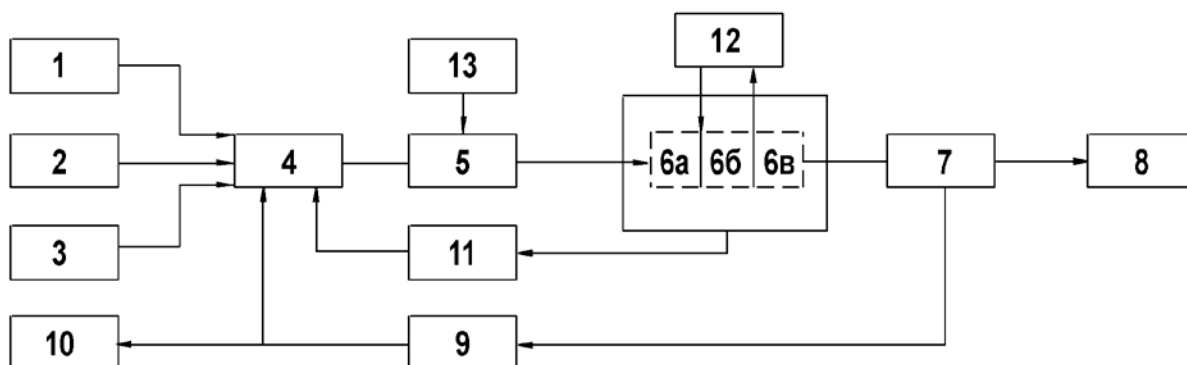


Рис. 6.14. Блок-схема ЭГВУ:

1 - задающий генератор; 2 - генератор высокочастотных колебаний; 3 - датчик статического положения поршня гидроцилиндра; 4 - сумматор; 5 - электронный усилитель; 6 - электрогидравлический преобразователь (сервоклапан); 6а - электродинамическое устройство; 6б,6в - гидроусилители; 7 - гидравлический исполнительный механизм (гидроцилиндр); 8 - датчик нагрузки; 9 - обратная связь по положению поршня; 10 - индикатор; 11 - местная обратная связь; 12 - маслонасосная станция; 13 - стабилизированный источник питания

Электрические сигналы с задающего генератора 1, высокочастотного генератора 2 (вырабатывающего напряжение для ликвидации «залипания» золотника сервоклапана), датчика статического положения поршня (стола) 3 поступают на сумматор 4. Результирующий сигнал после усилителя 5 поступает на вход электрогидравлического преобразователя (сервоклапана 6). Последний бывает двух (см. рис. 6.11) или трехкаскадным. В первом каскаде (электрогидравлическом устройстве) 6а электрический сигнал преобразуется в давление жидкости масла, которое вызывает перемещение распределительного золотника (второй каскад) 6б. Третьим каскадом 6в является второй (силовой) золотник. С его помощью изменяется давление потока масла в полостях гидравлического исполнительного механизма 7. Второй и третий каскады сервоклапана являются гидравлическими усилителями ЭГВУ. Контуры обратной связи 9, 11 служат для управления режимом работы ЭГВУ и контроля параметров вибрации.

Рассмотрим электро-гидравлическую схему вибрационной установки «Гидропульс» фирмы «Schенck»^{*)} (Германия). Спектр их применения чрезвычайно широк: от исследования динамических характеристик образцов, элементов конструкций машин и механизмов до проверки вибропрочности и функционирования сложных изделий аэрокосмической техники на заданных программой режимах.

^{*)} С 2002 г. фирма «Schенck» входит в корпорацию «Instron Structural Testing Systems» (ISTS).

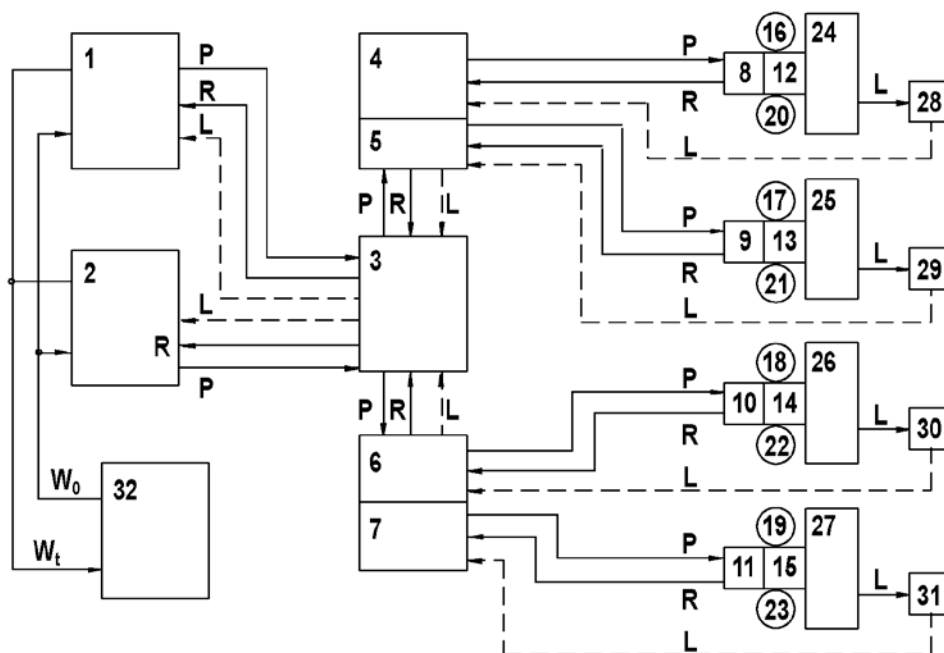


Рис. 6.15. Схема соединения элементов гидравлики ЭГВУ «Гидропульс»:
 1,2 - гидравлические агрегаты PP 165B; 3 - уравниватель давления; 4...7 - соединительные вентили; 8...11 - мультиклапаны; 12...15 - серво-клапаны; 16...19 - гидроаккумуляторы высокого давления; 20...23 - гидроаккумуляторы низкого давления; 24...27 - гидроцилиндры; 28...31 - отсасывающие насосы; 32 - охлаждающая установка; P - масло высокого давления; R - масло низкого давления; L - слив утечки масла; W_0 - холодная вода; W_t - теплая вода

На рис. 6.15 приведена схема соединений гидравлики ЭГВУ системы «Гидропульс» фирмы «Schenck» со следующими техническими характеристиками:

рабочий диапазон частот	0...200 Гц;
динамическое толкающее усилие одного гидроцилиндра	128 кН;
ход поршня	± 200 мм;
рабочее давление масла	27 МПа;
максимальный расход масла в одном цилиндре	250 л/мин;
потребляемая мощность	200 кВт;
метод охлаждения	водяное.

Конструкция типового гидроцилиндра фирмы «Schenck» представлена на схеме рис. 6.16.

В полости гидроцилиндра 1 размещается поршень 2, штоки которого 3 опираются на гидростатические подшипники 4. Внутри каждого штока установлен индуктивный датчик перемещения 5 типа PFM, который служит для контроля положения штока и обратной связи по перемещению.

Непосредственно на гидроцилиндре монтируется сервоблок SBL с гидроаккумуляторами и мультиклапаном. Основой сервоблока является трехкаскадный сервоклапан. В первом каскаде управляющий электрический сигнал небольшой мощности (~ 50 мВт) преобразуется в гидравлическое давление, которое вызывает перемещение распределительного золотника (второй каскад). Третьим каскадом является второй золотник с большим проходным сечением, который распределяет гидравлическую энергию в полостях рабочего гидроцилиндра. Положение второго золотника измеряется при помощи датчика смещения

и используется во вспомогательной цепи обратной связи. Сервоблок включает в свой состав гидроаккумуляторы высокого и низкого давления, служащие для аккумулирования и отдачи энергии, демпфирования гидравлических ударов, пульсаций и коммутационных толчков.

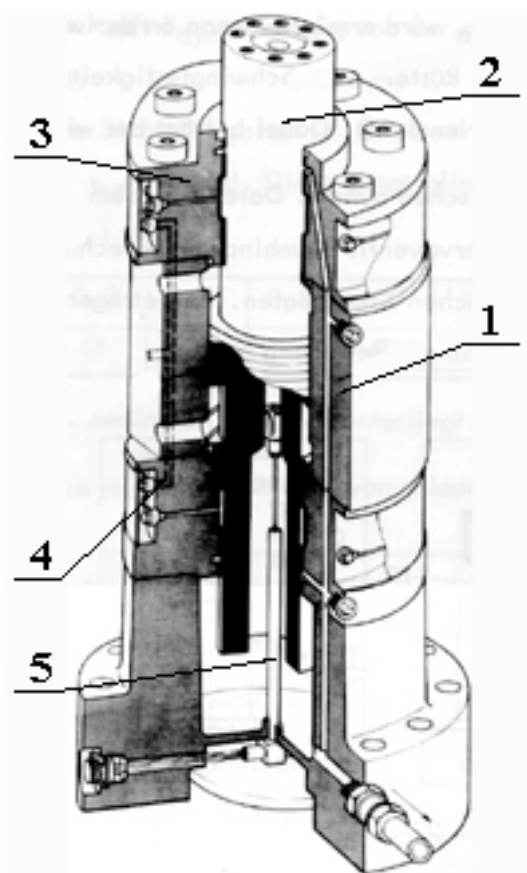


Рис. 6.16. Конструктивная схема гидроцилиндра фирмы «Schenck»:
1 - гидроцилиндр; 2 - поршень; 3 - шток; 4 - гидростатический подшипник; 5 - датчик перемещения типа PFM

Расположенный на сервоблоке мультиклапан представляет собой предохранительное устройство, автоматически прекращающее подачу давления в цилиндр при возникновении различных аварийных ситуаций. Внешний вид собранных гидроцилиндров различных типов фирмы «Schenck» представлен на фото рис. 6.17.

Как правило, на шток гидроцилиндра устанавливается датчик силы тензометрического типа, например РМ- R_n . Он служит для контроля толкающего усилия и обратной связи по силе.

Следующим элементом гидравлической схемы является гидравлический агрегат типа РР165В, представленный на фото рис. 6.18. Он предназначен для создания энергии напора масла высокой степени чистоты с постоянным эксплуатационным давлением 27 МПа. Гидроагрегат состоит из масляного бака, на крышке которого смонтирован виброизолированный электродвигатель, приводящий во вращение радиально-поршневой насос с переменным расходом. С насосом соединены блок управления с фильтрами высокого давления, предохранительные клапаны и манометр.



Рис. 6.17. Внешний вид гидроцилиндров с сервоблоками фирмы «Schenck» PL16K; PLz7.5N; PL25OP

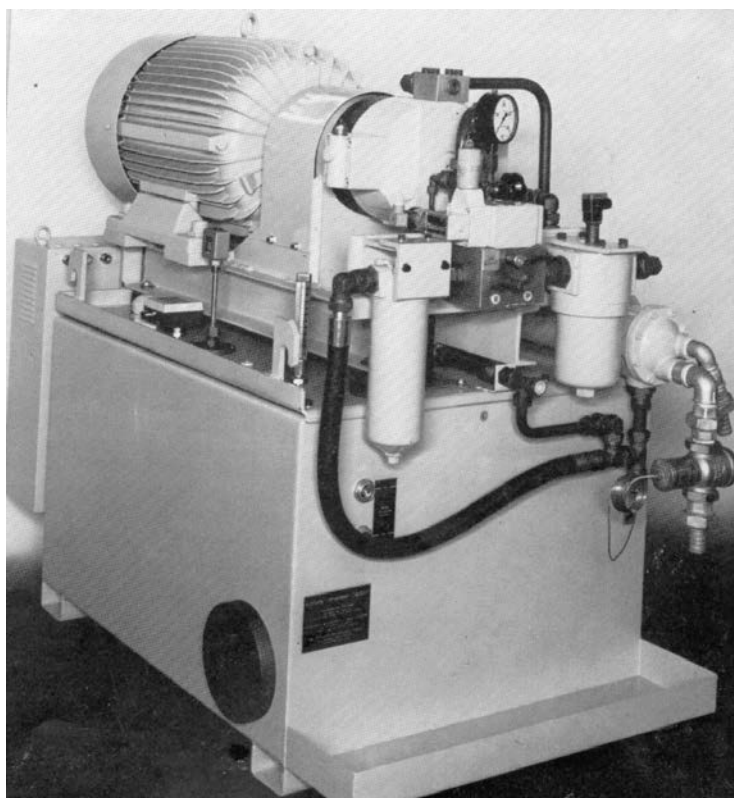


Рис. 6.18. Общий вид гидравлического агрегата типа PP165B

Масло высокого давления с гидроагрегатов 1, 2 (рис. 6.15) подается в уравниватель 3, далее поступает через соединительные вентили 4...7 и мультиклапаны 8...11, обеспечивающие подачу масла в заданном режиме в зависимости от начального расположения штока поршня, в сервоклапаны 12...15.

Нормальную, в соответствии с программой нагружения, работу гидроцилиндров обеспечивают отсасывающие насосы PNB утечек масла 28...31, а также охлаждающая установка EWK/44. Последняя представляет собой весьма сложную систему, состоящую из градирни, резервуара для охлаждающей воды, циркуляционного оборудования, трубопроводов и устройств управления.

Системы управления сервогидравлических вибрационных установок работают с постоянной обратной связью, т.е. с замкнутым контуром регулирования. Непрерывно измеряемое в этом контуре действительное значение регулируемой величины X сравнивается с ее положительным значением W . Отклонения номинального значения от действительного ведут к изменениям устанавливающего сигнала сервоклапана Y и, соответственно, к необходимому воздействию на регулируемый объект, являющийся сложной колеблющейся системой с более или менее выраженным режимом успокоения и частотами собственных колебаний. Задача устройства регулирования, с одной стороны, состоит в том, чтобы отклонения амплитуды и фазы при изменениях номинального и под влиянием возмущающих воздействий были по возможности малыми, а с другой стороны - в необходимости избавления системы от самовозбуждающихся собственных колебаний. Это достигается непрерывной во времени юстировкой пропорциональных (P), интегральных (I) и дифференциальных (D) звеньев так называемого PID-регулятора. Стандартным представителем такого электронного блока является регулятор типа RV311 фирмы «Schenck». Этот регулятор, как и ряд других устройств, входят в состав пульта управления ЭГВУ.

Блок-схема одного из каналов пульта управления ЭГВУ «Гидропульс» приведена на рис. 6.19.

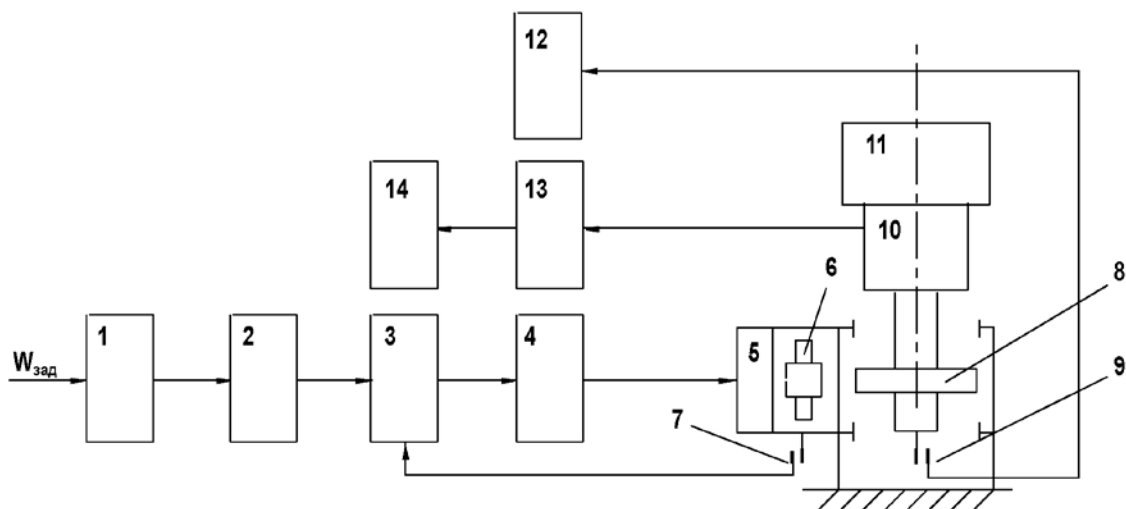


Рис. 6.19. Блок-схема одного из каналов пульта управления ЭГВУ "Гидропульс":

1 – регулятор входного уровня типа FP311; 2 – основной PID-регулятор типа RV311; 3 – вспомогательный PD-регулятор типа RV332; 4 – усилитель мощности типа RL311; 5 – сервоклапан; 6 – третий каскад сервоклапана; 7 – датчик перемещения второго золотника; 8 – гидроцилиндр типа PL160P; 9 – датчик перемещения штока типа PFM; 10 – динамометр типа PM-R_n; 11 – испытываемая конструкция; 12, 13 – предварительные измерительные усилители типа MV311; 14 – цифровой показывающий прибор MA313; $W_{зад}$ – входной сигнал

Каждая из четырех электронных систем осуществляет следящее регулирование по перемещению штока поршня при помощи основного и вспомогательного PID- и PD-регуляторов^{*)} и формирует входной управляющий сигнал для сервоклапана.

Система работает следующим образом. Задающий синусоидальный сигнал $W_{зад}$ поступает на регулятор входного уровня 1, далее на основной PID-регулятор 2, куда приходит также усиленный предварительным усилителем 12 сигнал отрицательной обратной связи с датчика перемещений штока 9. Затем сигнал поступает на вспомогательный PD-регулятор 3, куда приходит также сигнал отрицательной обратной связи с датчика перемещений 7 второго золотника сервоклапана 6. Далее, усилившись в усилителе мощности 4, сигнал поступает на сервоклапан 5. Главным регулирующим органом является основной PID-регулятор, вспомогательный PD-регулятор осуществляет лишь коррекцию сигнала.

Между испытываемым изделием 11 и штоком гидроцилиндра устанавливается динамометр 10, сигнал которого, пропорциональный толкающему усилию, поступает через предварительный усилитель 13 на цифровой показывающий прибор 14 и в устройства защитной автоматики для предотвращения максимального допустимого толкающего усилия. Защитная автоматика срабатывает также по заданной программе при недопустимых перемещениях штока, резком падении давления масла в гидросистеме и т.д.

Существуют два типа систем управления ЭГВУ: управление виброускорением и управление силой. Кратко рассмотрим первую, как наиболее применимую в практике отработки КА.

Для формирования задающего сигнала в системе управления виброускорением используется схема, показанная на рис. 6.20.

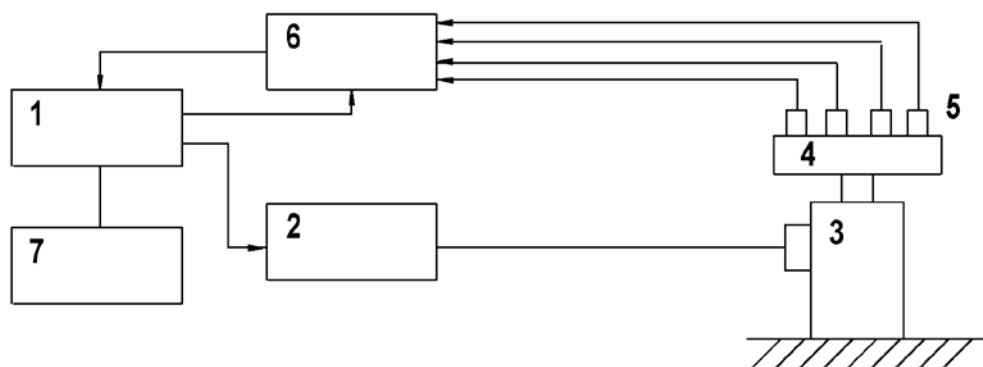


Рис. 6.20. Блок-схема системы управления виброускорением:

- 1 – управляющий генератор типа 1047; 2 – пульт управления ЭГВУ (см. рис. 7.19); 3 – гидроцилиндр; 4 – испытываемая конструкция; 5 – датчики-акселерометры типа 4367, 4334; 6 – многоточечная система задания и контроля вибраций типа 5686; 7 – самописец уровня типа 2307

В соответствии с этой схемой управление осуществляется многоточечной системой задания и контроля вибраций типа 5686 и управляющим генератором типа 1047. Применение указанной аппаратуры позволяет:

- осуществлять сканирование частоты с заданной скоростью;

*) PD-регулятор - устройство для регулирования перемещения устанавливает положение распределительного поршня третьей клапанной ступени и вместе с клапаном, измерительным усилителем MV331 образует блок трехступенчатого сервоклапана.

- поддерживать уровень виброускорения постоянным в точке крепления датчика-акселерометра;
- в случае использования нескольких датчиков выбирать из их показаний наименьшее, наибольшее или среднее значение уровня виброускорения.

ЭГВУ системы «Гидропульс» в большинстве своем управляются специализированными управляющими ЭВМ. С этой целью фирмой «Schenck» была разработана группа программ FMR. Для эффективного управления и обработки результатов испытаний материалов и элементов конструкций, полученных испытательными комплексами «Гидропульс» с цифровой электронной системой управления серии 56, используются персональные компьютеры типа PC/AT и программное обеспечение «Квиктест – Бейсик».

В последнее десятилетие фирмой «Schenck» разработаны и производятся новые цифровые системы управления ЭГВУ с использованием современной элементной базы. Одним из представителей таких систем являются системы серии 8800.

ЭГВУ системы «Гидропульс» позволяет легко наращивать число рабочих гидроцилиндров для многоточечного воздействия на испытуемый объект.

Электродинамические вибрационные установки (ЭДВУ) нашли особо широкое применение в отработке электронных систем, узлов и агрегатов автоматики и механики с массой до 20000 кг в частотном диапазоне 5...2500 Гц. Некоторые типы серийно выпускавшихся электродинамических вибраторов, успешно применяемых в аэрокосмической технике, представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3

Модель вибратора	Модель усилителя	Толкающее усилие, кН		Перемещение, мм	Ускорение, g	Диапазон частот	Страна, фирма
		синус	случайное				
ВЭДС-1500		15		± 6		5...2000	СССР
VP-1200	TW 36000	55	35	25,4	100	—«—	Англия DERRITRON
VP-700	TW 3600	40	28	—«—	—«—	—«—	—«—
V 980	MPA-96	136	120	—«—	—«—	—«—	Англия LING
V 954	MPA-32	40	31	—«—	—«—	—«—	DINAMIK SYSTEM LTD (LDS)
VIB 5000 TSV5-3000	TSV 72	49		$\pm 12,5 (\pm 25)$	—«—	—«—	Австрия ELIN UNION
VIB 6000 TSV5-3000	TSV 96	59		$\pm 12,5 (\pm 25)$	—«—	—«—	—«—
VIB 10000 TSV5-2500	TSV 96	98		—«—	90	—«—	—«—
VIB 16000 TSV5-2300	TSV 240	160		—«—	—«—	—«—	—«—
VS-3205HS	VA-10	25		40	100	—«—	Япония IMV
G-0310	G12-085	100		25	—«—	—«—	Япония SHINKEN CO LTD

На рис. 6.21 представлена конструкция вибратора фирмы «ELIN» Австрия типа MZV205W.

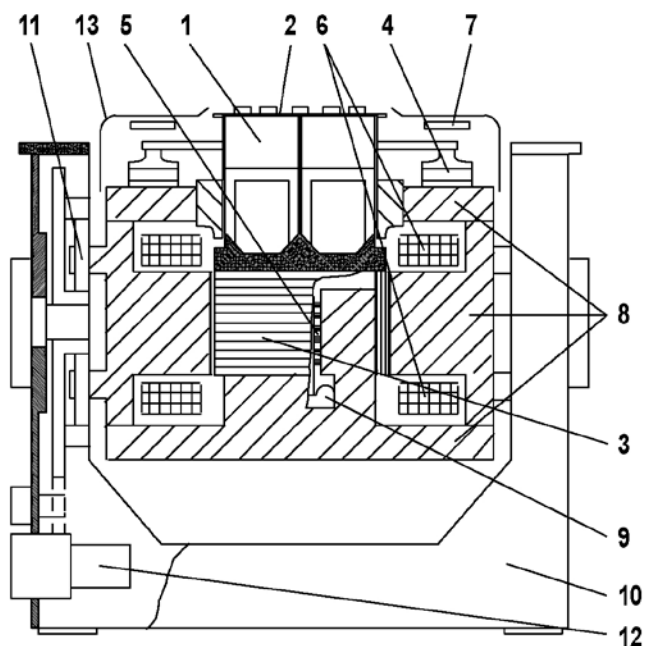


Рис. 6.21. Поперечное сечение вибратора типа MZV205W:
 1 - станина; 2 - механизм поворота; 3 - подвесное устройство магнитопровода; 4 - магнитопровод; 5 - намагничивающие катушки; 6 - подвижный элемент; 7 - рабочий стол; 8 - подвижная катушка; 9 - шариковый подшипник; 10 - коробчатые пакетные пружины; 11 - пневматическое разгрузочное устройство; 12 - размагничивающие катушки; 13 - крышка вибратора

На станине 1, оснащенной механизмом поворота 2 и подвесным устройством магнитопровода 3, подвешивается непосредственно магнитопровод 4, внутри которого размещаются две намагничивающие катушки 5. Подвижный элемент 6 состоит из рабочего стола 7, переходящего в подвижную катушку 8. Боковые смещения катушки устраняются шариковым подшипником 9 и коробчатыми пакетными пружинами 10. Передача осевых усилий с подвижного элемента на магнитопровод и станину осуществляется через пневматическое разгрузочное устройство 11. Размагничивающие катушки 12 и крышка вибратора 13 предохраняют испытуемый объект от воздействия магнитного поля магнитопровода. Помимо вибратора к силовой части ЭДВУ относятся: транзисторный переключательный усилитель мощности, источник питания поля намагничивания, охлаждающий агрегат. Стенд оснащен системами регулирования и управления, обеспечивающими испытания как на синусоидальную, так и на случайную вибрацию.

Принципиально вибраторы различных фирм близких номиналов (выталкивающих усилий и частот) мало, чем отличаются друг от друга, однако, имеют ряд конструктивных особенностей, определяющих их облик. Так, вибростенды фирмы «LDS» имеют пневмокордовую систему подвески магнитопровода и распределенную пневмосистему разгрузки подвижной катушки, вибраторы фирмы «Shinken» за счет повышенной жесткости конструкции работают в расширенном до 7...10 кГц диапазоне частот.

Схема соединений элементов ЭДВУ на примере вибратора типа V 980 фирмы «LDS» представлена на рис 6.22.

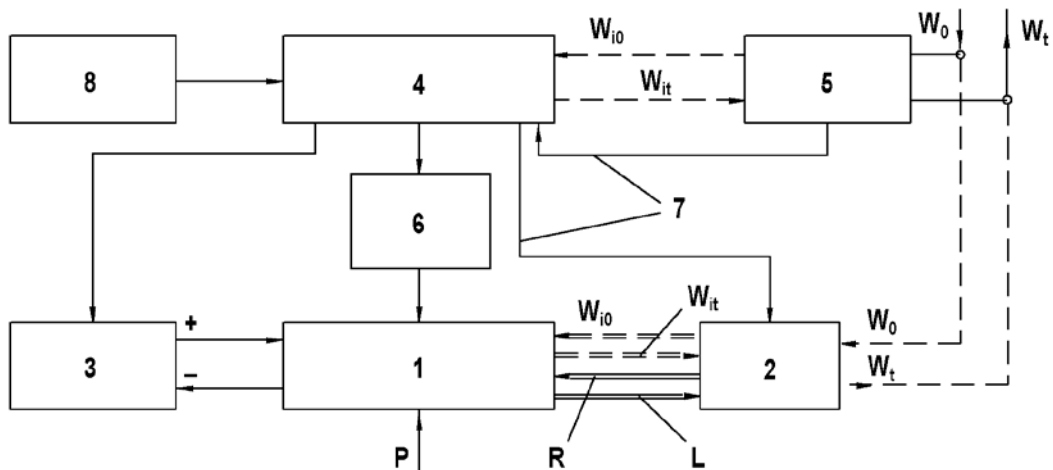


Рис. 6.22. Схема соединений элементов ЭДВУ:

1 - электродинамический возбудитель V 980; 2 - установка охлаждения вибратора CU 980; 3 - установка намагничивания катушки FPS8; 4 - усилитель мощности МРА 64-96; 5 - установка охлаждения усилителя мощности W96; 6 - согласующий трансформатор; 7 - соединительные кабели; 8 - пульт управления ЭДВУ; W_0 - холодная вода; W_t - теплая вода; P - воздух технологический; R - масло холодное; L - масло горячее; W_{i0} - холодная дистиллированная вода; W_{it} - теплая дистиллированная вода

Внешний вид электродинамического вибратора типа V980 фирмы «LDS» представлен на рис. 6.23.

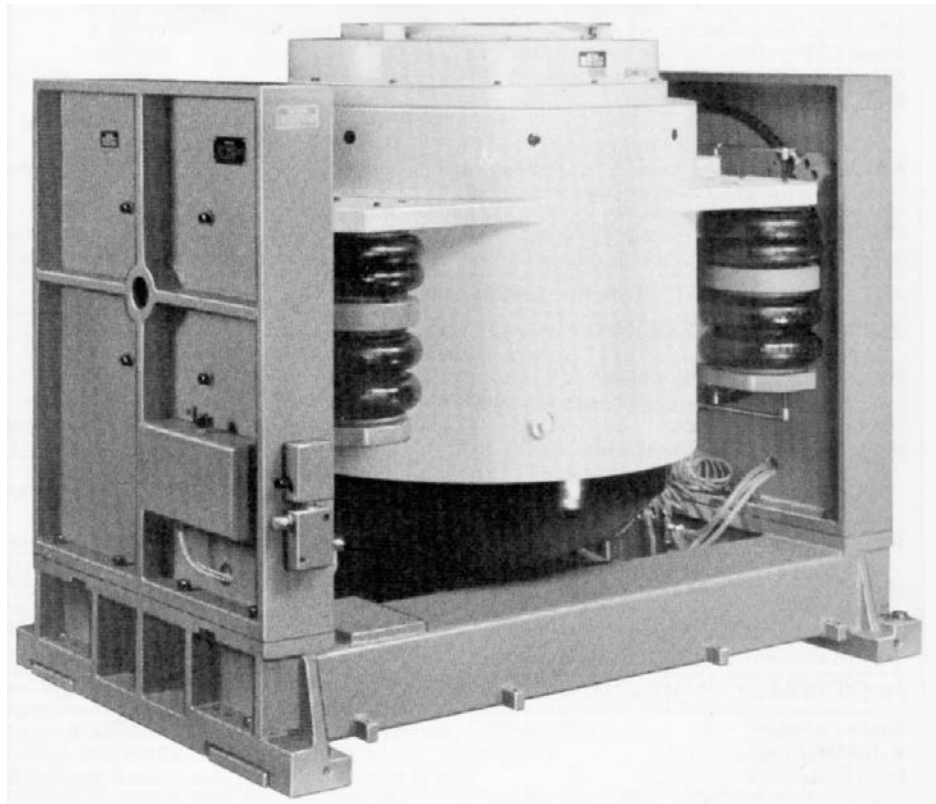


Рис. 6.23. Вид электродинамического вибратора типа V 980

В целях достижения значительных (свыше 100 кН) выталкивающих усилий в последние годы производится объединение двух, четырех и более ЭДВУ в комплексы.

В качестве примера рассмотрим комплекс четырех ЭДВУ типа V980 фирмы «LDS». Комплекс объединяет четыре принципиально одинаковых установки, которые могут работать синхронно и автономно. Рабочие столы вибратора связаны между собой единым скользящим столом, как это показано на фото рис. 6.24.

В случае объединения двух вибраторов может использоваться специальная опорная платформа (см. рис. 6.25).

Суммарный вектор силы, создаваемый виброкомплексом четырех вибраторов типа V 980 при синусоидальных колебаниях составляет ~400 кН, при случайных вибрациях ~ 360 кН в частотном диапазоне 5...2000 Гц.

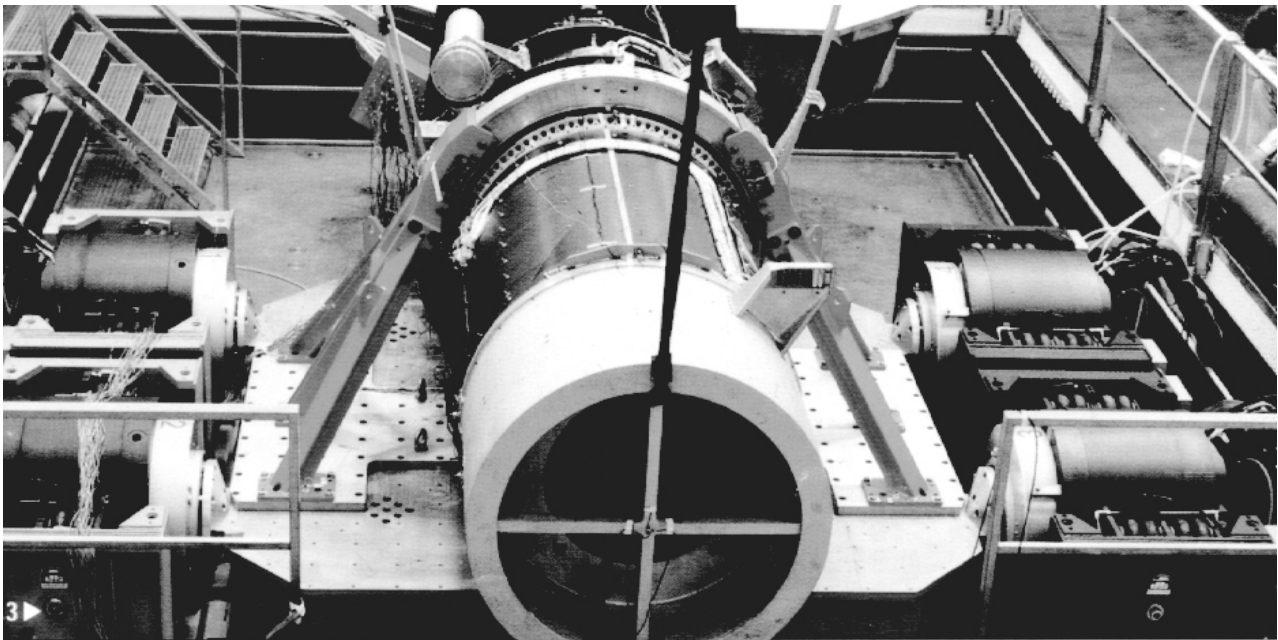


Рис. 6.24. Комплекс электродинамических вибрационных установок 4 x V 980 фирмы «LDS» (Великобритания)

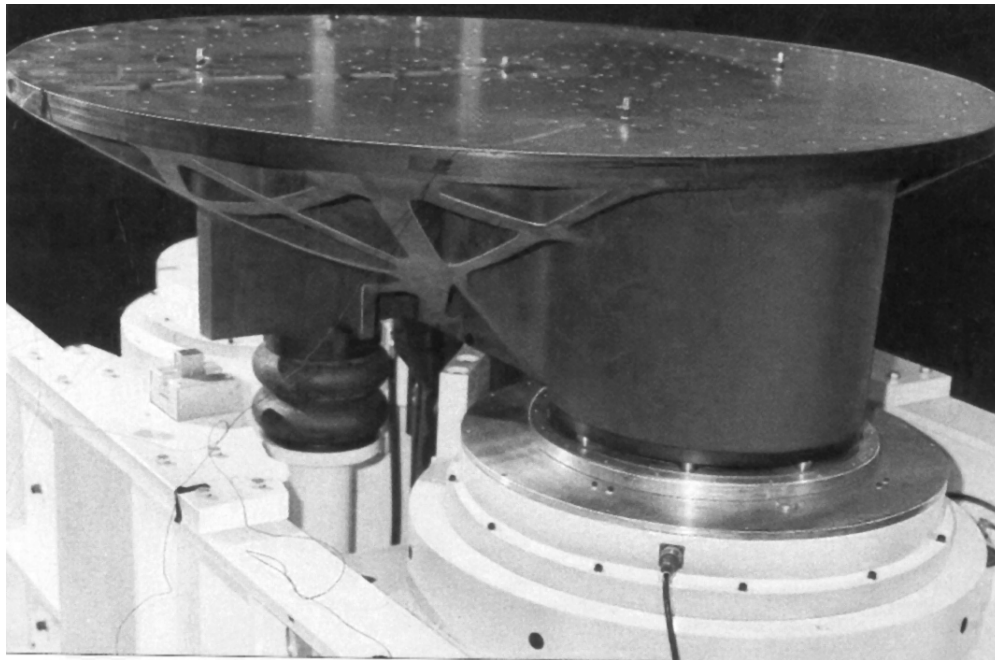


Рис. 6.25. Специальная опорная платформа для спаренных вибраторов литой конструкции из магниевого сплава
(Научный центр INTESPACE, Тулуза, Франция)

Потребляемая мощность комплекса 1352 кВт, расход воды охлаждения 1672 л/мин. Схема соединений и узлов виброкомплекса приведена на рис. 6.26.

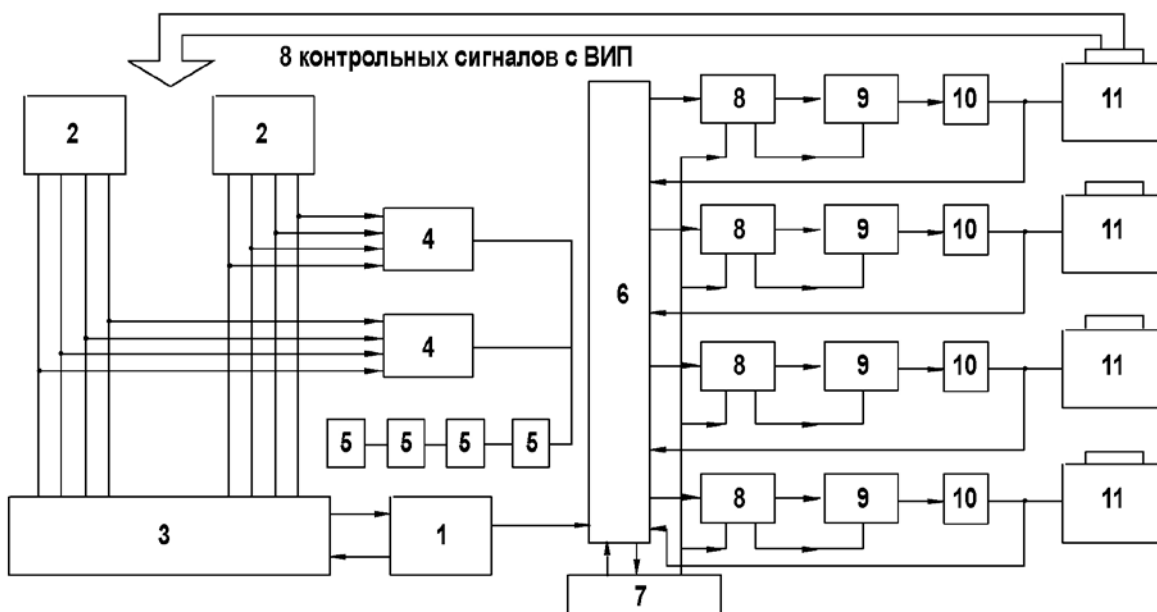


Рис. 6.26. Схема соединения приборов и узлов виброкомплекса:
1 - генератор SPC-4; 2 - усилитель зарядов СА4; 3 – усреднитель сигналов SA-8; 4 - усилитель LDA-4; 5 - графопостроитель; 6 - устройство управления фазой PCU-4; 7 - панель переключений DCP-4; 8 - панель дистанционного управления RCP; 9 – усилитель мощности MPA 64-96; 10 - согласующий трансформатор 980/MPA 64-94; 11 - электродинамический вибровозбудитель V 980

Прежде чем пояснить работу комплекса в целом, отметим следующее. Работоспособность электродинамического возбудителя V980 обеспечивается двумя системами охлаждения: водяной и масляной.

Водяная, использующая дистиллированную воду, охлаждает подвижную катушку, масляная - гидростатические подшипники. Вибратор требует также подвода технологического воздуха для работы пневмокордового разгрузочного устройства. Помимо установки охлаждения вибровозбудителя в состав ЭДВУ входит установка охлаждения транзисторного модульного усилителя мощности.

Виброкомплекс ЭДВУ, показанный на схеме рис.6.26, работает следующим образом. Генератор сигналов 1 формирует синусоидальный сигнал управления с заданной частотой и амплитудой и подает его на четырехканальное устройство управления фазой 6. С панели переключений 7 производится выбор включения той или иной ЭДВУ, или их комбинаций для совместной работы. Команда выбора, как и сигнал генератора, приходят на устройство управления фазой 6. Далее сигнал управления подается на панели дистанционного управления 8 выбранных ЭДВУ, их усилители мощности 9, согласующие трансформаторы 10 и вибровозбудители 11. Для поддержания заданных фаз перемещений столов вибровозбудителей, работающих на общую нагрузку, организована обратная связь по току.

При вибрационных испытаниях сложных конструкций перегрузки распределяются неравномерно, причем неравномерность, достигающая значительной величины, может привести к перегрузке или недогрузке важных узлов конструкции. С целью уменьшения этой неравномерности на испытываемом изделии располагают несколько (в данном случае до 8) ВИП. Их сигналы усиливаются двумя усилителями зарядов 2 и подаются на восьми-канальный усреднитель сигналов 3. Выход из устройства 3 может быть результатом усреднения от 2 до 8 входных сигналов или максимальным из них. В последнем случае все входные сигналы просматриваются поочередно, и канал с наибольшим сигналом непосредственно подключается к выходному гнезду. Скорость выборки - 4 раза в секунду, точность $\pm 2\%$. При синусоидальном режиме работы используется опорный сигнал от генератора 1. Прибор 3 в этом случае работает как следящий фильтр. На генератор 1 с усреднителя сигналов 3 поступает сигнал обратной связи. По нему и заданной оператором программе формируется сигнал управления.

Усилитель 4 и графопостроитель 5 служат для записи информации с контрольных точек на бумагу.

Тенденция роста мощности вибрационных установок (ВУ) приводит не только к усовершенствованию конструкций вибростендов, объединению их в комплексы, но и к разработке специальных дополнительных устройств, обеспечивающих повышенные толкающие усилия и амплитуды виброускорений. В этом плане наиболее продуктивной идеей является использование явления резонанса.

Динамика механической модели, включающей инерционный элемент массой m , упругий элемент с коэффициентом жесткости c_0 и демпфирующий элемент с коэффициентом сопротивления d_0 , описывается уравнением

$$mx + d_0x + c_0x = F_0 \cos \omega t . \quad (6.1)$$

Если в уравнении (6.1) поменять знаки на противоположные, то первый член левой части представит так называемую силу инерции, второй - диссипативную силу, а третий - восстанавливающую силу.

В консервативной системе при $\Omega = \Omega_0$ восстанавливающая сила уравновешивается силой инерции. Поэтому вынуждающая сила ничем не компенсируется, амплитуда колебаний увеличивается и возникает резонанс. В диссипативной системе вынуждающая сила компенсируется диссипативной, и увеличение амплитуды колебаний ограничено, причем

$$x_{max} = \frac{F_0}{d_0 \omega^2 - b}, \quad (6.2)$$

где $b = \frac{d_0}{2m}$ - коэффициент демпфирования.

При синусоидальном кинематическом возбуждении $x = x_0 \cos \omega t$ и уравнение (7.1) принимает вид

$$mx + d_0 \dot{x} + c_0 x = F \cos(\omega t + \varphi). \quad (6.3)$$

Максимальная амплитуда колебаний при $\omega = \omega_0$ определяется по формуле

$$x_{max} = \frac{F}{d_0 \sqrt{\omega_0^2 - b^2}} = \frac{x_0 \sqrt{c_0^2 + d_0^2 \omega_0^2}}{d_0 \sqrt{\omega_0^2 - b^2}}. \quad (6.4)$$

Кроме увеличения амплитуды колебаний явление резонанса дает выигрыш в уменьшении энергетических затрат. В момент резонанса между внешним воздействием и вынужденными колебаниями устанавливаются такие фазовые соотношения, при которых скорость колебаний системы оказывается в фазе с внешним воздействием. При этом в систему поступает наибольшая мощность, и создаются наиболее благоприятные условия для возбуждения вынужденных колебаний.

Из уравнения (6.4) видно, что величину максимальной амплитуды колебаний можно регулировать за счет изменения амплитуды x_0 входного возмущения. Все это в целом повлекло широкое применение явления резонанса в машиностроении, в частности, в испытательной технике.

Существуют резонансные вибростенды различных типов: электродинамические, электрогидравлические, пьезоэлектрические, электромагнитные. Роль жесткого звена в их конструкциях выполняет испытуемый образец или специальный упругий элемент.

При проведении вибропрочностных испытаний приборов, агрегатов или деталей на фиксированной частоте испытуемые изделия размещаются не непосредственно на столе вибровозбудителя, а на возбуждаемом специальном приспособлении, имеющем резонанс на этой частоте [74]. С целью расширения частотных диапазонов резонансных вибрационных установок применяют резонирующие элементы с регулируемой жесткостью. Это балки с изменяемой изгибной жесткостью, пневматические резинокордные оболочки (ПРКО). Изменение жесткости пневматических оболочек возможно путем регулирования давления воздуха в оболочке или изменения ее объема.

В вибродинамической лаборатории ЦСКБ долгие годы успешно эксплуатируются вертикальная (см. фото на рис. 6.27) и горизонтальная (см. фото на рис. 6.28) резонансные вибрационные установки на базе электрогидравлического вибровозбудителя типа ЭГВ 10-200 П и пневматических резинокордных оболочек.

Анализ использования явления резонанса в испытательной технике приводит к следующим выводам:

- применение резонирующих устройств и элементов в виброустановках существенно расширяет эксплуатационные возможности серийно выпускаемых вибровозбудителей любых типов с ограниченной амплитудой виброперемещений подвижного стола;
- коэффициент эффективности вибровозбуждения (КЭВ) может достигать 5...10 и более;
- регулирование максимальной амплитуды колебаний и ее поддержание возможно путем изменения амплитуды входного воздействия;

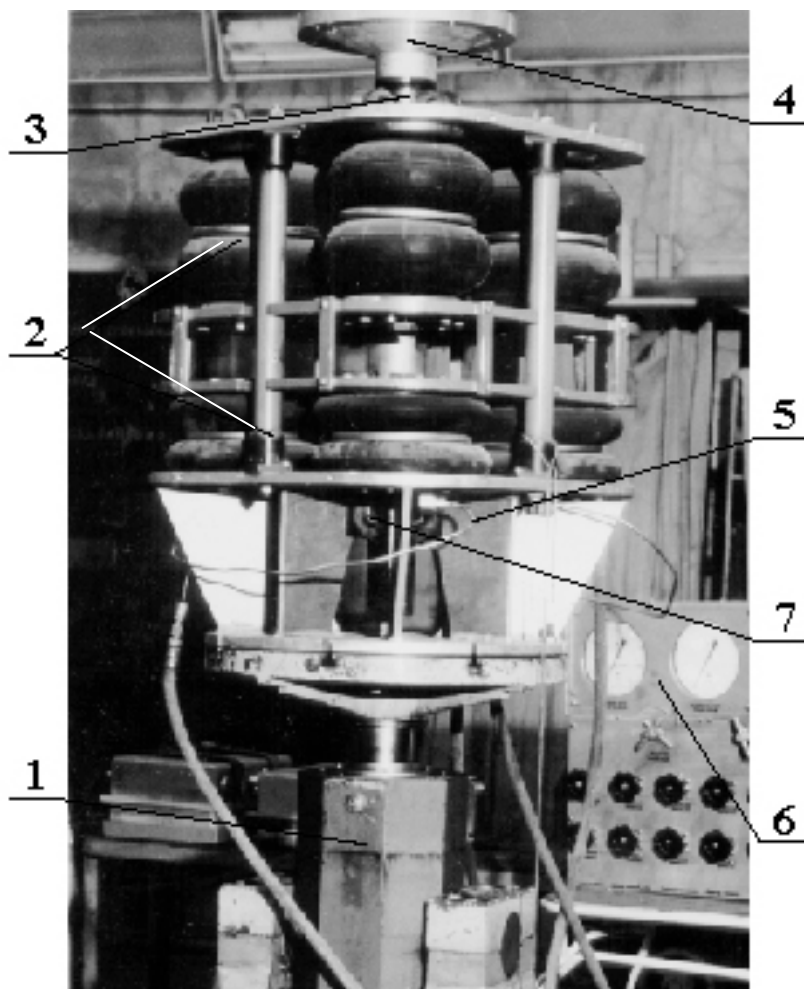


Рис. 6.27. Общий вид вертикальной резонансной виброустановки:
 1 - электрогидравлический стенд ЭГВ10 -200 П; 2 - ПРКО; 3 - направляющий шток; 4 - стол резонансного приспособления; 5 - трубопроводы, подводящие воздух к оболочкам; 6 - пневмопульт; 7 - направляющие ролики

- резонансные ВУ имеют достаточно высокий коэффициент производительности K_{Π} за счет снижения энергозатрат на возбуждение при резонансных фазовых соотношениях вынужденных колебаний испытуемого изделия;
- резонирующие устройства, благодаря своим фильтрующим свойствам, используются при калибровке виброизмерительной аппаратуры;
- главный недостаток резонансных ВУ - возможность проведения вибрационных испытаний только на фиксированных частотах.

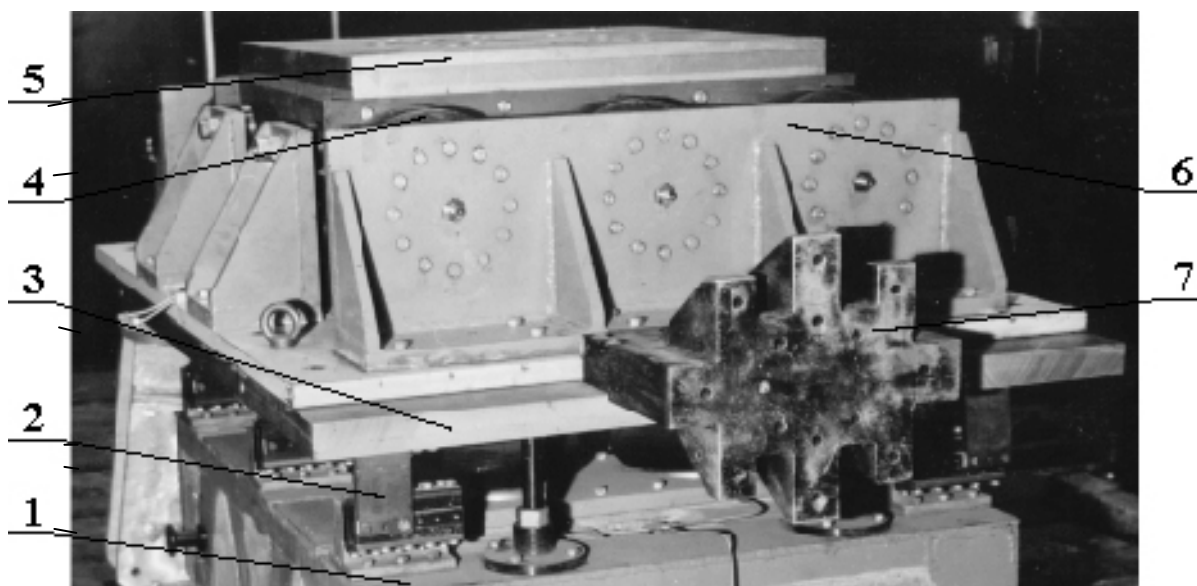


Рис. 6.28. Общий вид горизонтальной резонансной виброустановки:
 1 - основание; 2 - упругие пластины; 3 - платформа; 4 - ПРКО; 5 - вибростол; 6 - резонирующее приспособление; 7 – переходник к электрогидравлическому вибростенду

Необходимо отметить успешное использование многими лабораториями систем электродинамических силовозбудителей, устройств управления ими и ЭВМ анализа данных кампании PRODERA (Франция) для исследования форм и частот собственных колебаний сложных аэрокосмических конструкций.

6.4. Оснащение ЛВИ и оснастка для обеспечения виброиспытаний КА

Лаборатории вибрационных (вибродинамических) испытаний (ЛВИ) представляют собой достаточно сложные инженерные сооружения. Они имеют: виброизолированный от фундаментов и стен силовой пол с пазами для закрепления силового оборудования и оснастки (как правило, пол имеет массу более чем в 100 раз превышающую массу испытуемых изделий)^{*)}; силовой контур, обеспечивающий обезвешивание изделия над вибратором; стапель обслуживания изделия; звукоизолированный бокс, либо другие системы шумоглушения, предохраняющие персонал от воздействия высокочастотной вибрации.

ЛВИ включает в свой состав энергооснащение помещения для усилителей мощности, пультовые управления ЭДВУ, измерительные пультовые, помещение для маслонасосной станции ЭГВУ, градирню (возможен подвод оборотного водоснабжения), помещения для калибровки средств измерений, склада оснастки и вспомогательного оборудования. ЛВИ должна быть обеспечена технологическим воздухом высокого и низкого давления.

Планировка типовой ЛВИ, способной решать задачи отработки вибропрочности космических аппаратов, представлена на рис. 6.29.

^{*)} При использовании электродинамических виброустановок, оснащенных совершенными системами разгрузки вибратора (последнее условие не является обязательным).

Необходимо отметить, что она, как правило, имеет несколько испытательных залов, и те из них, в которых устанавливаются электродинамические стенды, имеют хорошую звукоизоляцию. Зал для испытаний изделий в сборе и малогабаритных конструкций типа солнечных батарей и антенных устройств должен иметь максимально возможную высоту для размещения тросовых систем обезвешивания изделий с малыми (до 0,5...0,8 Гц) собственными частотами колебаний.

Силовые полы со значительной (свыше 1000 т) массой обычно являются основанием для установки не только вибраторов, гидроцилиндров, но и силовых контуров и ступеней обслуживания установок.

Требование приложения вектора перегрузки к изделию в различных направлениях приводит к необходимости различного размещения испытываемого объекта относительно оси вибровозбудителя. Более того, максимальное приближение экспериментальной установки к условиям эксплуатации связано с соблюдением граничных условий при одновременном удовлетворении условиям нормальной работы испытательного оборудования. Это достигается с помощью специальных приспособлений технологической оснастки, получившей в практике проведения испытаний название вспомогательное стендовое оборудование (ВСО). Его элементы носят условное название вспомогательные стендовые устройства (ВСУ). Включенные в общий испытательный комплекс ВСУ оказывают прямое влияние не только на надежность работы оборудования, но и на достоверность результатов испытаний, на эффективность всей системы экспериментальной наземной обработки КА.

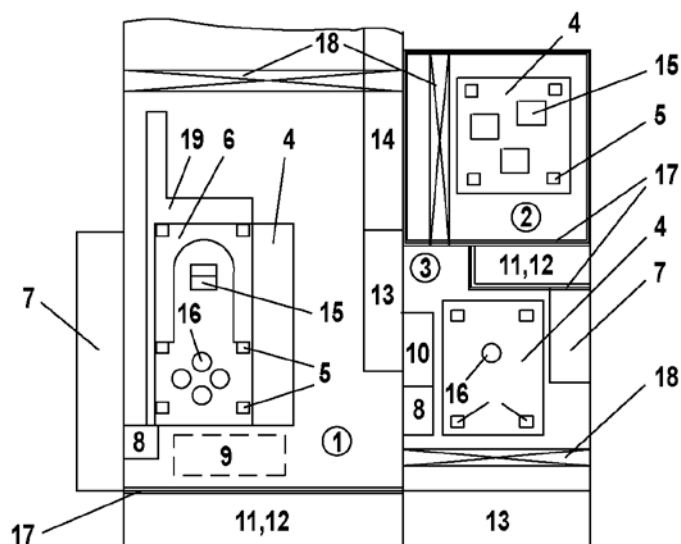


Рис. 6.29. Планировка типовой ЛВИ для обработки вибропрочности КА:

1 - зал виброиспытаний КА в сборе; 2 - вибробокс для высокочастотных испытаний узлов и агрегатов КА; 3 - зал низкочастотных ресурсных, статодинамических испытаний; 4 - виброизолированный силовой пол; 5 - колонны силового контура; 6 - ступень обслуживания изделия; 7 - помещения для усилителей мощности, источников питания полей намагничивания, охлаждающих агрегатов ЭДВУ; 8 - галерея; 9 - подвальное помещение маслостанции ЭГВУ «Гидропульс»; 10 - маслостанция зала № 3; 11 - пультовые управления ЭДВУ, ЭГВУ (1 этаж); 12 - пультовые измерительного комплекса (2 этаж); 13 - склады оснастки; 14 - трансформаторная подстанция; 15 - вибраторы ЭДВУ; 16 - гидроцилиндры ЭГВУ; 17 - звукоизолирующая; 18 - мостовой кран; 19 - силовая стена

ВСУ проектируются и изготавливаются в следующих случаях:

- испытываемый объект является громоздким, массивным и вес его не может быть удержан подвесной подвижной частью вибростенда;
- испытания проводятся по трем осям виброперегрузки;
- динамический (опрокидывающий) момент не может быть скомпенсирован вибратором.

Применяемые для вибрационных испытаний устройства и приспособления по своему назначению можно условно разбить на следующие основные группы:

1. Приспособления «Соединения» для сопряжения (стыковки) испытываемых изделий с вибраторами или подвижными столами вибростендов.
2. Приспособления (системы) для вывешивания или опирания изделий, так называемые разгрузочные устройства (РУ).
3. Приспособления для предотвращения перекосов и поломок подвижных частей вибростендов и обеспечения необходимого направления возбуждения.

Для разработки названных приспособлений необходимо иметь следующие данные:

- сведения о методиках нагружения и измерения параметров о силонагружающем и измерительном оборудовании;
- случаи нагружения испытываемого объекта;
- требования к приспособлению (допустимая масса, жесткость, габариты, конструктивные особенности, допуски на координаты центра тяжести);
- типы объектов, испытываемых с данными приспособлениями;
- место проведения испытаний (тип силового контура, стапеля обслуживания).

Проектирование и изготовление ВСУ, как правило, требует значительных усилий и материальных затрат, которые по оценкам зарубежных фирм могут достигать до третьей части полной стоимости всех испытаний.

Рассмотрим подробнее все группы названных приспособлений.

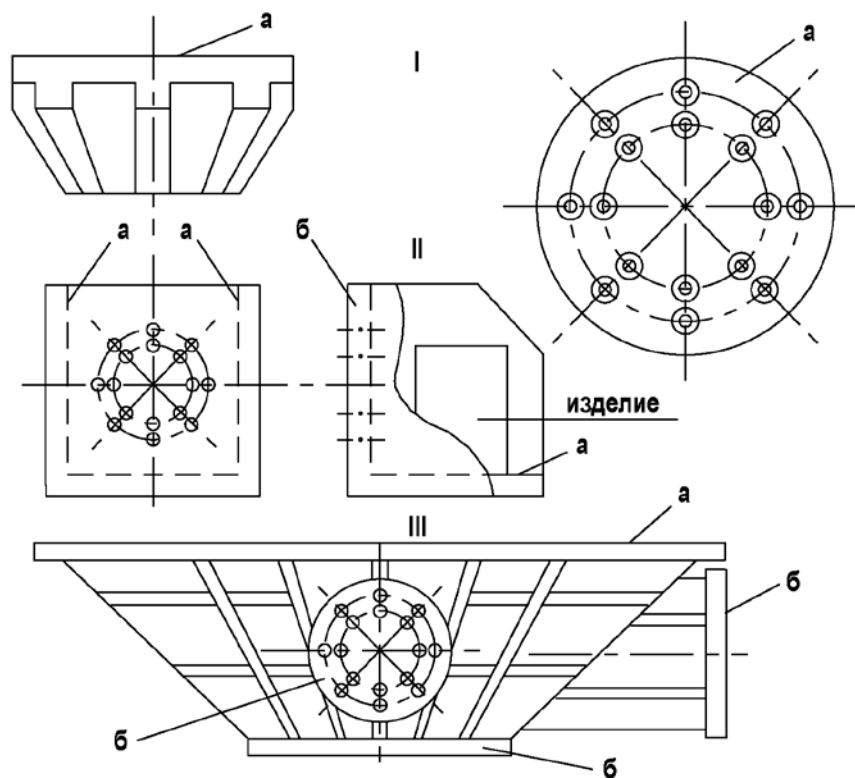


Рис. 6.30. Виды приспособлений «Соединение»:

I - однонаправленное; II - двухнаправленное; III - трехнаправленное; а - плоскость стыковки с изделием; б - плоскость стыковки с вибратором

Приспособления «Соединения» имеют стыковочные плоскости: «стол вибратора – приспособление» и «приспособление – изделие». У приспособлений однонаправленного действия плоскость «стол вибратора – приспособление» одна, у двух или трех - соответственно две или три (см. рис. 6.30).

Приспособления «Соединения» имеют огромное влияние на результаты испытаний по следующим причинам:

- динамические характеристики системы «изделие- приспособление–вибратор» (в том числе частотные и демпфирующие) существенно зависят от динамических характеристик приспособления;
- жесткостные и массовые характеристики приспособления оказывают влияние на коэффициент передачи виброн нагружения от вибратора к изделию;
- разъемные соединения и стыковки элементов в приспособлении приводят к ослаблению уровня нагружения.

Для уменьшения влияния приспособлений на результаты испытаний они должны удовлетворять следующим требованиям:

- резонансные частоты приспособлений не должны находиться в рабочем диапазоне частот испытываемых изделий или, в крайнем случае, в наиболее важном для испытываемого изделия частотном поддиапазоне;
- приспособления должны быть достаточно жесткими, чтобы передавать к точкам крепления испытываемых изделий колебания стола вибростенда без искажения, т.е. без излишнего усиления или ослабления;
- амплитуды виброускорений в направлениях осей, по которым в данный момент не проводится возбуждения, должны быть минимальными;
- приспособления должны обеспечивать проведение испытаний по трем взаимноперпендикулярным осям, если это не ухудшает условий испытаний в каждом из направлений;
- материал, применяемый для изготовления приспособлений, должен обеспечивать их достаточную жесткость при наименьшем весе;
- конструкция приспособлений, по возможности, не должна содержать болтовых соединений.

Учесть все перечисленные (а в ряде случаев и специальные) требования в одном типе конструкции не представляется возможным, поэтому приходится выбирать из них наиболее важные для конкретной программы испытаний. Между тем, определяющим параметром при проектировании приспособлений «Соединения» является их вес. Он зависит от заданной возмущающей силы, требуемого уровня виброускорений, диапазона частот и веса испытываемого изделия.

Другой важной характеристикой рассматриваемых приспособлений является его жесткость, которая особенно важна при определении динамических характеристик изделия. Требования к жесткости приспособлений «Соединения» наиболее высоки при испытаниях легких объектов и головных обтекателей.

Проектирование приспособлений начинается с предварительной оценки их собственных частот, которые определяются модулем упругости и удельным весом используемого материала, а также конструкцией самого приспособления. Лучший материал с этой точки зрения - бериллий, а затем - алюминиевые и магниевые сплавы. Последние более предпоч-

тительны из-за высоких демпфирующих свойств, кроме того, они обеспечивают большую жесткость приспособления при одинаковом с алюминиевыми сплавами весе. Наиболее предпочтительными, с точки зрения отсутствия «паразитных резонансов», являются литые конструкции, но они значительно дороже сварных.

В целях обеспечения нормального функционирования оборудования, взаимное расположение составных элементов системы «изделие - приспособление - стол вибростенда» должно быть таким, чтобы направление действия возбуждающей силы проходило через центр тяжести указанной сборки. Это обстоятельство сводит к минимуму нежелательные угловые повороты приспособления и стола вибратора, а также дополнительные угловые ускорения испытываемого изделия.

При испытаниях конструкция должна быть закреплена на приспособлении штатно, крепление последнего к столу вибратора должно осуществляться таким образом, чтобы жесткость соединения не изменяла первую собственную частоту изделия. Равномерность завинчивания болтовых соединений должна обеспечиваться применением моментных ключей.

После изготовления приспособлений «Соединения» производится их аттестация с использованием эквивалентов номинальной нагрузки. В результате аттестации определяются следующие параметры приспособлений:

- амплитудно-частотные характеристики, показывающие зависимость коэффициентов вибропередачи от частоты;
- величины поперечных колебаний, характеризующие возбуждение по осям, перпендикулярным главной оси возбуждения колебаний;
- допустимое отклонение входного вибрационного воздействия в точках крепления испытываемого изделия к приспособлению.

Анализ полученных параметров определяет возможность применения приспособления при испытаниях той или иной конструкции.

Приспособления для вывешивания или опирания изделий. Конструкции летательных аппаратов в силу специфики условий эксплуатации относятся к типу безопорных и их подвеску необходимо осуществлять по так называемой «свободной схеме», которая позволяет воспроизводить граничные условия с определенной степенью точности. Такая подвеска может осуществляться одним из следующих способов:

- на стальных тросах (нитях);
- на шнуровых резиновых амортизаторах;
- на стальных тросах (нитях) с включением пневмоамортизаторов и силовозбудителей.

Подвеска изделия может быть вертикальной или горизонтальной (см. рис.6.31 а, б).

В связи с тем, что при горизонтальной подвеске длинномерных изделий типа головных обтекателей в их корпусах возникают значительные изгибные деформации, искажающие картину одноосного нагружения, такая подвеска используется достаточно редко. Наибольшее применение при вибрационных испытаниях получила вертикальная подвеска.

Общий вид вывешивания блока «И» РН «Русь» в испытательном стенде при приложении вибрационной нагрузки в направлении, перпендикулярном оси изделия, представлен на фото рис. 6.32.

На снимке хорошо видны упругие элементы, предотвращающие рыскание приспособления для стыковки изделия с вибраторами.

Для уменьшения влияния подвески на динамические свойства испытываемых объектов ее жесткость должна быть значительно меньше жесткости изделий. Это выполняется при следующем соотношении частот:

$$f_0 < 0,5 f_{min}, \quad (6.5)$$

где f_0 - частота системы «изделие – подвеска»,

f_{min} - низшая частота собственных упругих колебаний изделия в свободном состоянии или низшая частота исследуемого частотного диапазона при испытаниях.

Для того чтобы достичь выполнения условия (6.5) необходимо для изготовления подвесок применять материалы с очень большим коэффициентом демпфирования, например, резиновые амортизационные шнуры. Диаметр и количество шнуров подбирается в зависимости от веса изделия, как правило, подвеска должна удлиняться на 30...35 % от первоначальной длины. Конструктивная схема простейшей амортизационной подвески из резиновых шнуров представлена на рис. 6.33.

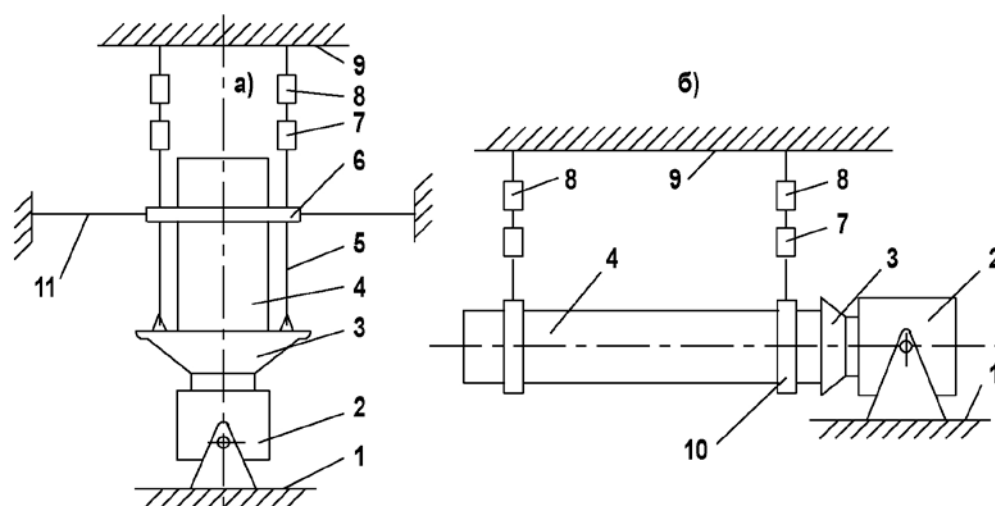


Рис. 6.31. Способы вывешивания изделия при виброиспытаниях:

а) вертикальная подвеска; б) горизонтальная подвеска;

1 - силовой пол; 2 - вибратор; 3 - приспособление для стыковки изделия с вибратором; 4 - изделие; 5 - трос; 6 - страховочный хомут; 7 - амортизационная подвеска; 8 - регулировочный тендер; 9 – верхняя силовая опора; 10 - бандаж; 11 - боковые тросовые растяжки

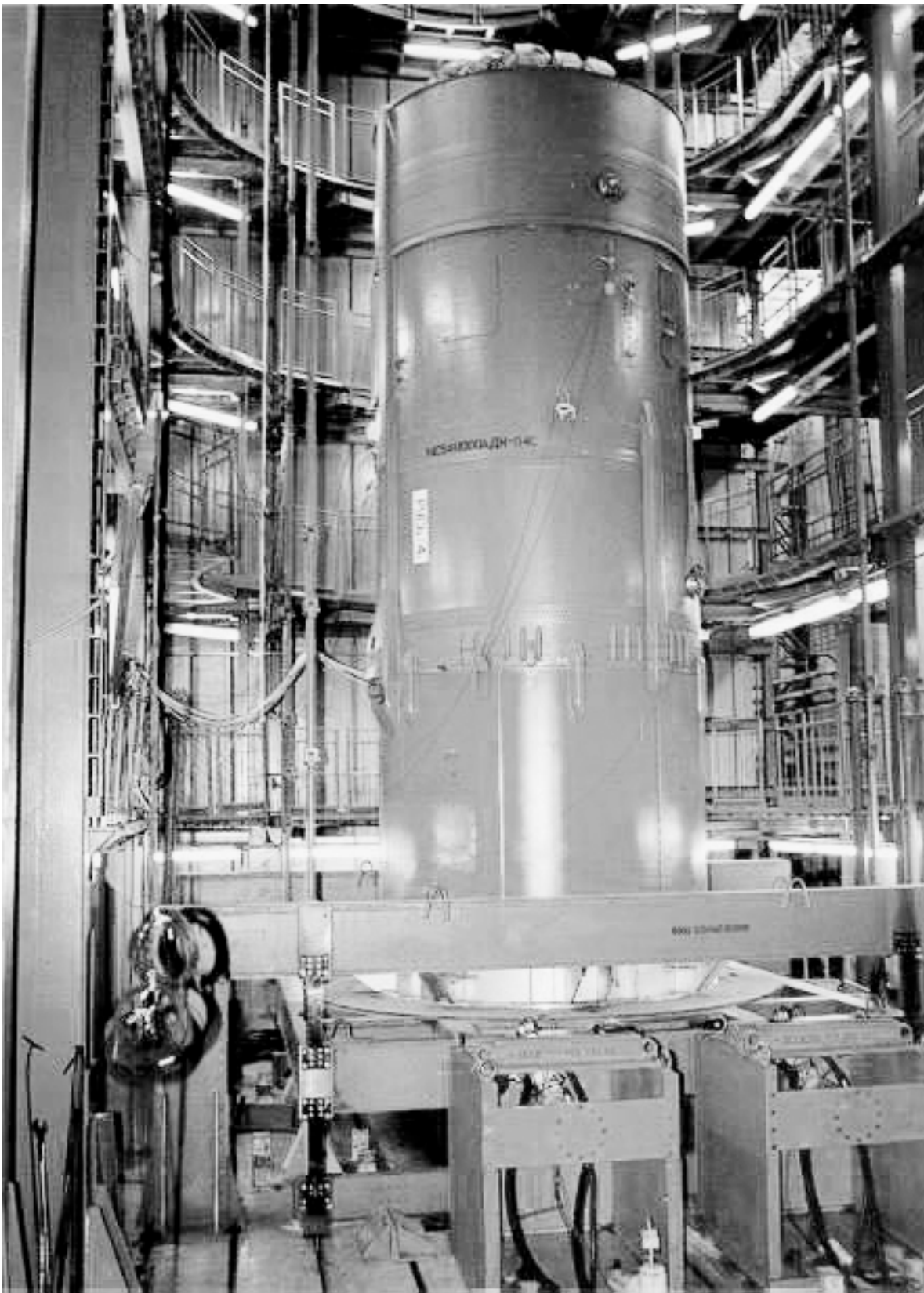


Рис. 6.32. Общий вид вывешивания блока «И» РН «Русь»
в испытательном стенде

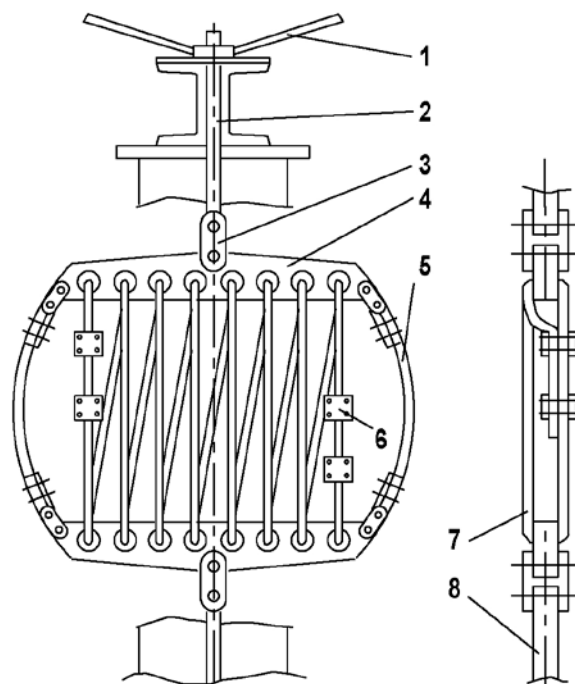


Рис. 6.33. Амортизационная подвеска:

1 - гайка; 2 - болт; 3 - серьга; 4 - пластина; 5 - трос; 6 - зажимное устройство; 7 - амортизационный шнур; 8 - шарнирная тяга

Такие и более конструктивно сложные подвески обычно используются для испытаний объектов с массой до 10...15 т. В качестве амортизаторов применяются резиновые шнуры диаметром 8...20 мм. При вывешивании изделий с массой свыше 15 т применяют пневмоамортизаторы (пневмоцилиндры), в одну цепь с которыми включают гидравлические силовозбудители, необходимые для осуществления качественной регулировки натяжения тросов подвески.

Общий вид системы подвески крупногабаритных изделий с использованием амортизаторов и винтовых пар с электромеханическим приводом представлен на рис. 6.34.

Помимо реализации «свободной схемы» нагружения вывешивание изделия осуществляется в тех случаях, когда его масса превышает предельное для заданного стенда значение. Предельная масса изделия, испытываемого на электродинамическом стенде, может быть рассчитана по формуле:

$$G_n = \frac{F}{n} - m_b, \quad (6.6)$$

где G_n - масса испытываемого изделия с приспособлением, кг;

m_b - масса подвижных частей вибростенда, кг;

n - заданная амплитуда вибрационного ускорения, м/сек²;

F - максимальная выталкивающая сила, Н.



Рис. 6.34. Общий вид системы амортизационной подвески изделия в испытательном стенде

Для контроля силы натяжения тросов системы подвески изделия часто используются динамометры, в то же время момент «обезвешивания» может быть определен по появлению видимого зазора между приспособлением и столом вибратора.

При проектировании систем вывешивания рассмотренного типа необходимо помнить, что их использование не приводит к увеличению выталкивающей силы.

В целях снижения боковых возмущающих усилий точки крепления упругих элементов стараются располагать симметрично относительно центра тяжести изделия, приспособления и стола вибростенда. Отклонение расчетного положения центра тяжести изделия от рабочей оси вибростенда не должно превышать ± 1 мм.

Особый интерес представляют системы вывешивания маложестких конструкций типа солнечных батарей (БС) и антенных устройств (АУ) в раскрытом состоянии. Собственная частота этих систем не должна превышать $0,1 \dots 1$ Гц, более того эти системы вывешивания должны оказывать минимальное воздействие на форму колебаний конструкции.

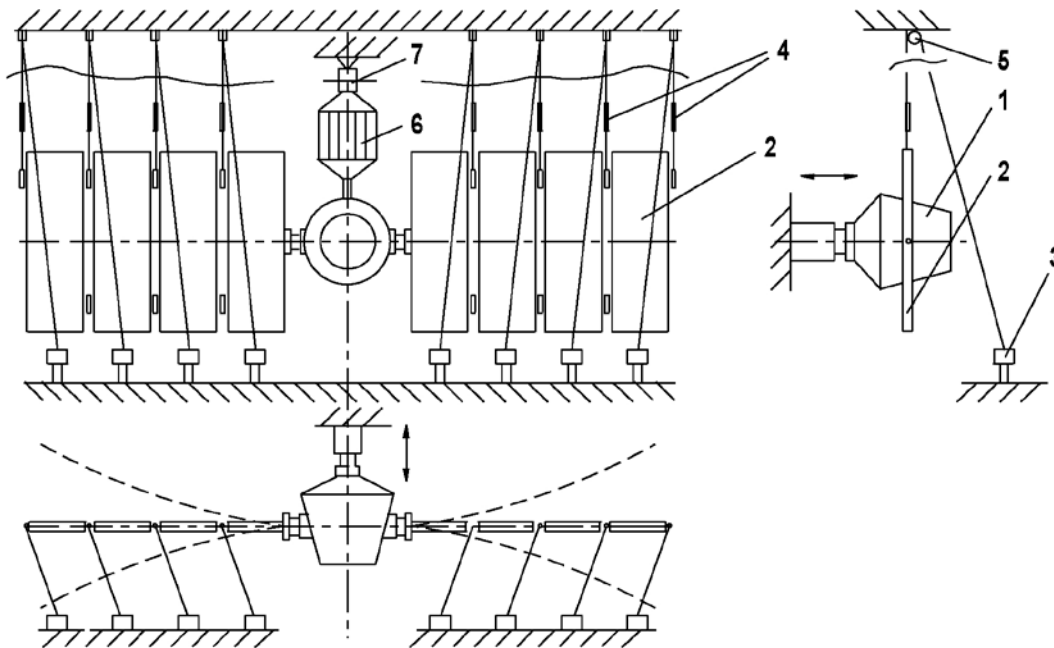


Рис. 6.35. Схема вывешивания БС в раскрытом положении:
 1 - отсек; 2 - панель БС; 3 - лебедка; 4 – резиновый амортизатор; 5 - блок; 6 - амортизатор развески отсека; 7 - регулировочный тендер

В большинстве случаев такие испытания проводят в лабораториях, имеющих значительную высоту испытательного зала (свыше 20 м) и позволяющих применять легкие резиновые амортизаторы большой длины и тросовые подвески.

На рис. 6.35 представлена схема испытания БС в 2-х плоскостях в раскрытом положении.

Недостатками тросовых систем вывешивания изделия (разгрузочных устройств) является их громоздкость, трудоемкость натяжения тросов для выставления плоскости стыковки испытательной оснастки со стороны вибростенда, возможность влияния упругих колебаний тросов на точность испытаний. Облегчает монтаж применение для натяжения тросов силовых гидроцилиндров.

Правильная установка изделия на стенде с помощью системы вывешивания является одной из важнейших монтажных операций подготовки к испытаниям.

Недостатки тросовых систем в определенной мере могут быть устранены при реализации так называемых схем опирания изделия на основе применения гидростатических, гидропневматических опор, пневмосильфонов и пневматических резинокордных оболочек. Наиболее простыми и надежными в эксплуатации является ПРКО. Собственные частоты лежат в пределах от 2 до 3 Гц и мало изменяются при значительных изменениях веса испытуемого изделия.

Как при использовании тросовых РУ, так и при простом опирании изделия не удастся избавиться от паразитных поперечных и крутильных его колебаний. Приходится применять дополнительные направляющие в виде тросовых растяжек, пластинчатых пружин или опор качения. Однако, применение тросовых растяжек малоэффективно, так как не исключает узловых и поперечных колебаний КА вследствие ослабления растяжек в процессе виброиспытаний. Кроме того, при использовании растяжек трудно выполнить требования по симметрии наложенных связей, исключить их влияние на динамику изделия. Пластинчатым пружинам и опорам качения свойственны те же недостатки, что и направляющим подвесок подвижного стола ЭДВУ.

Для горизонтального нагружения наилучшие результаты позволяют получить разгрузочные устройства - скользящие плиты (столы) [25,45].

Рассмотрим эти устройства подробнее. Скользящей плитой можно считать конструкцию, где подвижная плита лежит на тонкой пленке масла, создаваемого под давлением через систему отверстий в гранитном блоке и равномерно его покрывающего. При этом монтажные отверстия фланца вибратора совпадают с отверстиями в торце плиты, что обеспечивает ее движение параллельно поверхности гранитного блока (стола) и предотвращает паразитные колебания испытываемого объекта. Важнейшей конструктивно-технологической трудностью изготовления скользящей плиты является подгонка и полировка поверхностей плиты и гранитного блока для поддержания необходимой величины сил натяжения масляной пленки. Схема применения скользящей плиты для вывешивания изделия приведена на рис. 6.36.

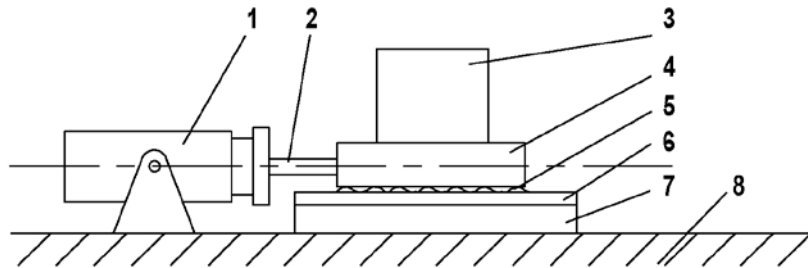


Рис. 6.36. Схема применения скользящей плиты для вывешивания изделия:

1 - вибратор; 2 - шток; 3 - изделие; 4 - скользящая плита; 5 - масляная пленка; 6 - гранитный блок; 7 - фундамент; 8 - силовой пол

Для вибрационных испытаний тяжелых КА нагрузками, действующими в вертикальном направлении с успехом могут использоваться РУ, выполненные по схеме опирания и сочетающие, пневматические резинокордные оболочки и гидравлические направляющие (ГСН) (см. рис. 6.37).

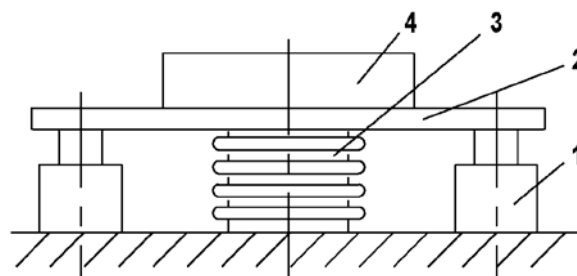


Рис. 6.37. Схема РУ с использованием ПРКО и ГСН:
1 - ГСН; 2 - платформа; 3 - ПРКО; 4 - изделие

Общий вид разгрузочного устройства с ПРКО и ГСН для работы на ЭДВУ типа V 980 приведены на рис. 6.38.

Другим, достаточно распространенным типом предохранительных устройств, являются роликовые направляющие. Пример одного из роликовых приспособлений для предотвращения поломок подвижных систем вибрационных стендов приведен на рис. 6.39.

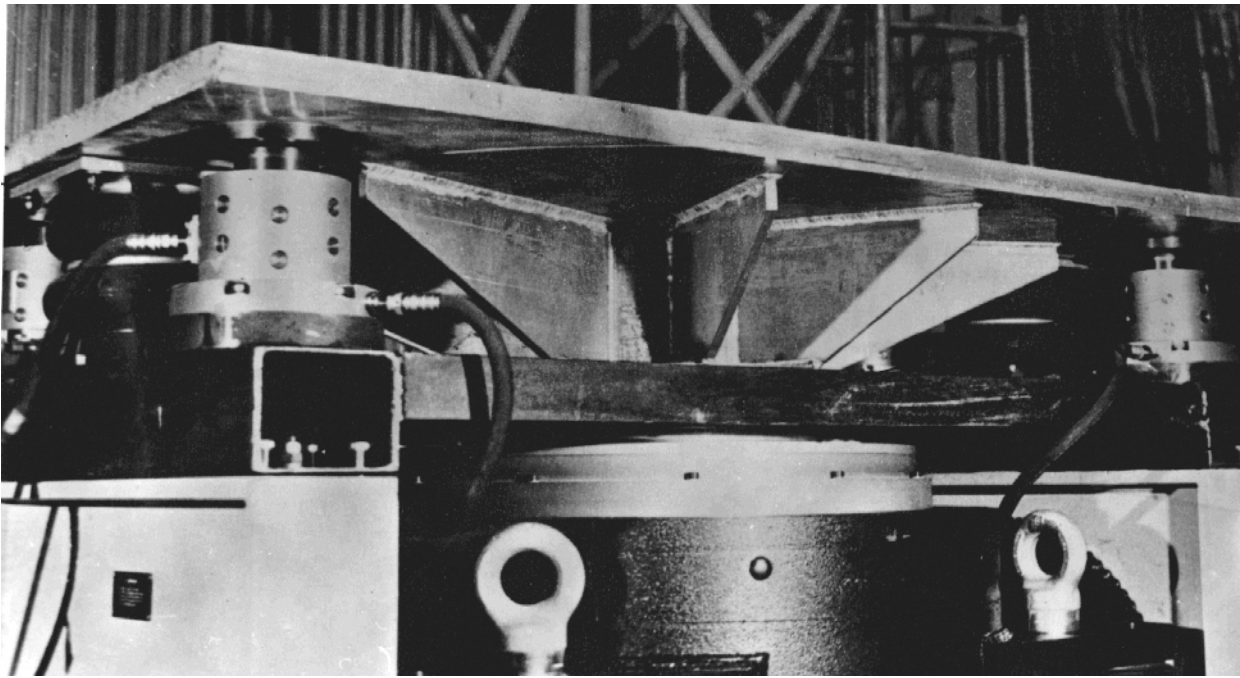


Рис. 6.38. Общий вид разгрузочного устройства с ПРКО и ГСН для ЭДВУ типа V 980

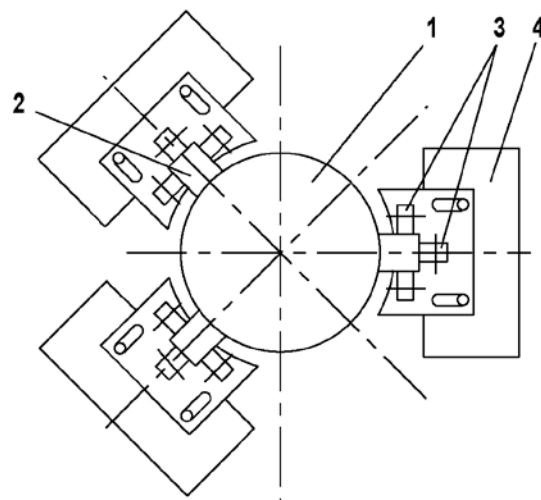


Рис. 6.39. Роликовое приспособление для предотвращения поломок подвижных систем:
1 - изделие; 2 - направляющие; 3 - ролики; 4 - опора

При возбуждении колебаний (до 200...250 Гц) двумя или несколькими вибраторами (например, транспортные испытания КА на имитаторе контейнера) возможно применение так называемых стрингеров. Стрингеры, представляющие собой стержни с переходными опорами и выполненные из высоколегированной стали, рассчитанные из условия сохранения устойчивости при воздействии максимально возможного динамического усилия, создаваемого вибратором, устанавливаются между подвижным столом вибратора и опорной плоскостью испытуемого изделия (см. рис. 6.40).

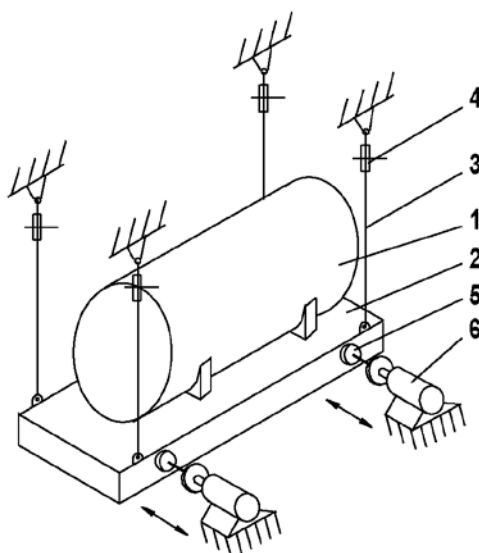


Рис. 6.40. «Стрингерная система» передачи динамических воздействий:

1 - изделие; 2 - платформа вывешивания; 3 - трос; 4 - регулировочный механизм; 5 - стрингер; 6 - вибратор

Стрингеры демпфируют изгибные поперечные колебания, передаваемые на штоки вибраторов в случае их появления в ходе испытаний из-за различных типов дисбалансов, возникающих в системе.

В случае превышения изгибающими моментами в стрингере предельных значений, он разрушается и разгружает вибратор, предотвращая его поломку.

В завершение раздела остановимся кратко на крепежных деталях, с помощью которых осуществляется монтаж изделий и оснастки для вибрационных испытаний. К ним относятся: различного типа болты, шпильки, балки, пластины. От правильного выбора и применения этих деталей существенно зависят качество проводимых испытаний и условия работы испытательного оборудования.

Основными из перечисленных деталей являются болты, они применяются для крепления изделий к приспособлениям и приспособлений к вибростолу.

Оценка собственной частоты резьбового соединения может быть сделана по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ESg}{LG}}, \quad (6.7)$$

где E - модуль упругости материала болта, Па;

g - ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

L - длина рабочей части болта, м;

G - общий вес закрепленного болтами груза, Н;

S - суммарная площадь поперечного сечения болтов, м^2 .

Для увеличения собственной частоты резьбового соединения рекомендуется уменьшать эффективную длину болтов (L) или увеличивать площадь поперечного сечения (S) при оптимальном выборе материала. Практически это означает увеличение количества болтов и их диаметра.

Жесткость болтового соединения является функцией его собственной жесткости и предварительного натяжения болта, поэтому важно, как уже указывалось выше, осуществлять строгий контроль за равномерностью затяжки и ее величиной.

Выполнение рассмотренных в настоящем разделе условий проектирования, изготовления и применения испытательной оснастки для вибрационных испытаний должно способствовать более качественному их проведению.

Вопросы проектирования вспомогательного стендового оборудования и разгрузочных устройств подробно рассмотрены в работах авторов настоящего пособия [83...88].

Один из эффективных способов повышения точности вибрационных испытаний летательных аппаратов приведен в работе [89] Самсонова В.Н. и Череваня А.А.

6.5. Автоматизированные испытательные комплексы для проведения вибрационных испытаний РКТ

Автоматизированным испытательным комплексом (АИК) вибродинамических испытаний в первом приближении назовем совокупность технических и программных средств управления вибровозбуждением, а также системы сбора, обработки, анализа и документирования данных эксперимента.

В практике испытаний в состав АИК обычно дополнительно входят приборы и оборудование контроля работоспособности вибровозбудителей, систем охлаждения, связи, визуального контроля за объектом испытаний и др.

Системы управления

Реализация того или иного вида вибрационных испытаний, описанных в разделе 6.1, требует различных конфигураций систем управления.

Основной задачей систем управления моногармоническими процессами является обеспечение заданного уровня первой гармоники или эффективного значения одного из параметров вибрации (ускорения, перемещения, пропорционального развиваемому усилию) при сканировании частоты возбуждения [24].

В других случаях указанные параметры должны изменяться по заданной программе, как функции времени или частоты [24,32]. При определении частотных характеристик изделий возникает задача управления скоростью сканирования частей возбуждения в зависимости от значений определяемой амплитудно-частотной характеристики [2].

При управлении полигармоническими процессами с фиксированными частотами необходима стабилизация или программное изменение во времени амплитуд отдельных гармонических составляющих.

Более сложные задачи возникают при управлении случайными вибрационными возмущениями, в отношении которых принято делать два основных допущения [92]. Первое состоит в том, что статические параметры, характеризующие вибрацию, достаточно медленно изменяются во времени и усреднение по частоте интере-

сующего нас временного интервала дает адекватное описание вибрационного состояния на этом отрезке времени.

Второе допущение основано на том, что вибрационное состояние изделия может рассматриваться как суперпозиция различных случайных процессов, возбуждаемых независимыми источниками, а в связи с тем, что в натуральных условиях измерению доступны только вибрации в интересующих точках конструкции, а не сами возмущающие силы, то отклонение от нормального закона распределения наблюдаемых вибраций скорее связано с наличием в конструкции механических нелинейностей, чем с отклонением от нормальности самих возмущающих сил. Если датчик виброперегрузок расположен в таком месте конструкции, где проявляются ее фильтрующие свойства, то закон распределения приближается к нормальному. Все это позволяет считать, что закон распределения вибраций в местах крепления вибратора к изделию не является важным критерием для задания возмущения [92].

Если ограничиться в случае однокомпонентных (пространственно-одномерных) вибраций моделью вибрационного возмущения в виде случайного стационарного гауссового централизованного процесса, то его полностью можно охарактеризовать корреляционной функцией, определяющей двумерный закон распределения в любой момент времени, или ее Фурье-преобразованием - спектральной плотностью. При исследовании воздействия вибраций на механические конструкции последняя характеристика наиболее информативна и имеет определяющее значение.

В последнее время при отработке сложных бортовых систем КА системой вибраторов реализуют векторный (пространственно-многомерный) нормальный, стационарный, случайный процесс, который полностью характеризуется его спектральной матрицей.

В случае многокомпонентных случайных вибраций задача управления формируется в более общем виде: на выходах многомерной динамической системы с неизвестной матрицей передаточных функций (частотных характеристик) воспроизвести векторный случайный с заданной спектральной матрицей.

Информацию о собственных и взаимных спектрах, которые надлежит воспроизвести при виброиспытаниях, получают в результате отработки записей вибраций, полученных в натуральных условиях эксплуатации на прототипе.

Структуры систем управления соответствуют решаемым задачам, методам испытаний (см. схемы на рис. 6.1...6.9) и, в самом общем случае, разделяются на разомкнутые и замкнутые (с обратной связью). По способу формирования управляющих сигналов системы выполняются аналоговыми цифровыми и гибридными

цифро-аналоговыми, включающими в свой состав цифровую ЭВМ для автоматической коррекции аналоговой системы управления при наличии нелинейных искажений в тракте усилитель-вибратор-изделие.

Обоснование структур аналоговых систем управления виброиспытаниями на случайные нагрузки, управления моно и полигармоническим возбуждением, а также гибридные системы управления, теоретические аспекты построения, алгоритмы управления и идентификации подробно рассмотрены в работе [38].

Системы измерения и анализа данных.

Экспериментальные исследования механических колебательных систем отличаются большим и непрерывно растущим количеством одновременно измеряемых параметров, необходимостью контроля условий эксперимента, его ограниченной продолжительностью, невозможностью повторного проведения эксперимента в абсолютно одинаковых условиях. Все это приводит к значительному росту трудоемкости и стоимости выполнения операций измерения и обработки данных. Поэтому требуется создание специальных автоматизированных технических средств измерения, способных осуществлять функции получения, сбора, накопления и обработки измерительной информации, выработки при необходимости команд управления испытательным оборудованием и представления заданных результатов эксперимента исследователю [40].

Названные тенденции в развитии техники эксперимента привели, как указывалось в главе 4, к появлению нового класса средств - измерительных вычислительных комплексов (ИВК), которые применительно к измерениям параметров колебательных процессов должны в первую очередь удовлетворять требованиям к скорости сбора информации и ее объему.

В 70...80 годы прошлого столетия в области построения систем автоматизации эксперимента получили распространение устройства связи ЭВМ с объектами, удовлетворяющие требованиям стандарта КАМАК. Аппаратура в соответствии с ним содержит набор устройств ввода-вывода (цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей), контроллеров (устройств, формирующих управляющие сигналы по требуемому закону) и мультиплексоров (специальных управляемых ЭВМ переключателей, «размножающих» сигнал по заданному числу каналов). Программное обеспечение включает в себя операционную систему с разделением функций, тестовое обеспечение, программные средства работы с аппаратными модулями и определения метрологических характеристик измерительных каналов.

На базе аппаратуры КАМАК и управляющих мини ЭВМ типа СМ 4, СМ 1420, СМ 1300 построено ряд ИВК (ИВК 1, 2, 6, 20), АСИВ-3, МПСД (ХИРЭ), число аналоговых входов которых достигает 64 при емкости ОЗУ 64 КБайт и времени преобразования АЦП до 1,5 мс.

Наряду с системой КАМАК успешно использовалась для виброизмерений в качестве средства связи с УВК устройство коммутирующее быстродействующее типа УКБ-200.

Необходимость использования в стандарте КАМАК ЭВМ, недостаточно высокое быстродействие последних привели к разработке широкой серии микропроцессоров, которые при создании системы сбора данных позволяют обойтись без специальных вычислительных средств и интерфейсов. Благодаря возможности параллельной работы многих микропроцессоров, могут быть созданы вычислительные системы сбора и обработки данных практически любой производительности. Этому способствует развитие технологий производства больших интегральных схем (БИС) и появление возможности эффективной организации на их основе алгоритмов вычисления быстрого преобразования Фурье (БПФ) для спектрального анализа вибрационного процесса, алгоритмов свертки, фильтрации и т.д. В последние годы активно внедряются ИВК на базе ПЭВМ серии РС/АТ, а также специализированных интерфейсных плат сопряжения с первичными средствами измерений, например, платы АЦП типа АДС 12/20М или ЦАП типа ДАС-12 отечественного производства.

Методика исследования и анализа вибрационных характеристик конструкций по экспериментальным данным с помощью ЭВМ, а также современные средства сбора, преобразования и обработки информации, принципы построения и состав математического обеспечения представлены в справочнике [38].

На [рис.6.41](#) дана типовая структурная схема АИК для ведения виброиспытаний с использованием ЭДВУ методом качания частоты.

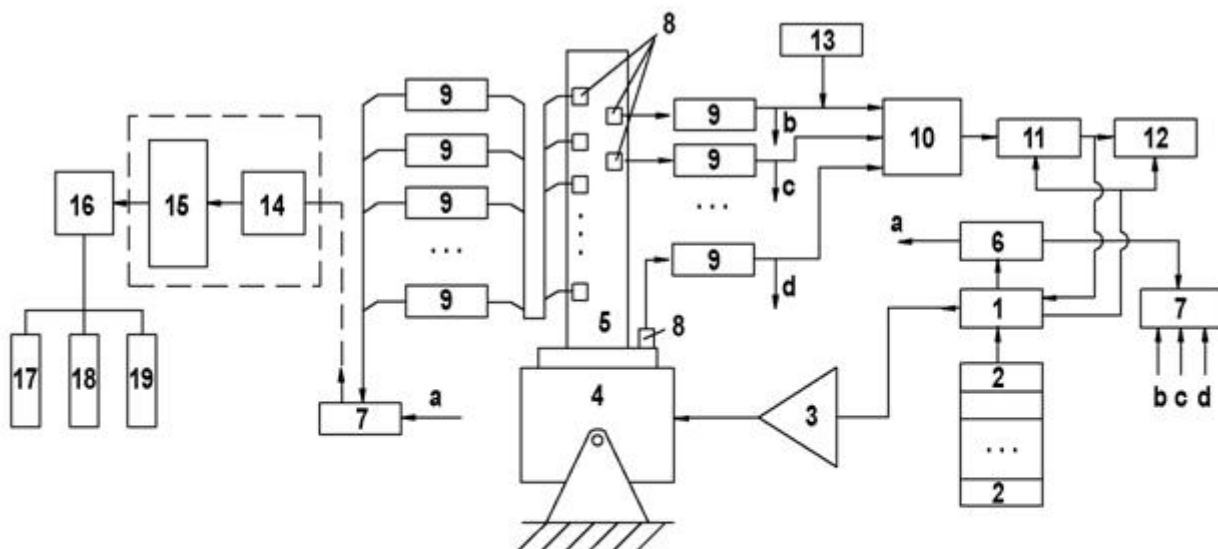


Рис. 6.41. Структурная схема АИК для виброиспытаний по методу качающейся частоты
 1 - генератор 1047 с АРУ и БКЧ; 2 - программирующее устройство ZH0100;

3 - усилитель мощности; 4 - вибратор; 5 - изделие; 6 - вспомогательный блок ZM0100;
 7 - магнитограф ЕАМ-500; 8 - ВИП; 9 - предусилитель 2626; 10 - селектор 5686; 11 - фильтр 2021;
 12 - самописец 2307; 13 - вольтметр замера фактического уровня сигнала 2426; 14 - УКБ-200;
 15 - УВК СМ 1300; 16 - ПЭВМ типа РС/АТ; 17 - монитор; 18 - принтер; 19 - графопостроитель

Аналоговая система управления вибрационным процессом построена на базе аппаратуры фирм Bruel & Kjaer (Дания) и LDS (Англия). Система измерений АСИБ-3 выполнена на основе УВК СМ 1300 и УКБ-200, объединенных в 16-ти канальное автономное устройство сбора информации. Обработка информации ведется на ПЭВМ серии РС/АТ.

Прежде чем пояснить работу АИК ([рис.6.41](#)), отметим, что в большинстве случаев испытаний управляющие ВИП устанавливаются как на столе вибратора, так и в теоретически определенных зонах изделия.

Рассмотрим отдельно системы управления и измерений.

Автоматизированная система управления ВИ, представленная на [рис.6.41](#), работает следующим образом. В соответствии с программой испытаний, задаваемой восемью программирующими устройствами ZH0100 (поз. 2) (устанавливаются требуемые уровни вибронагрузок и частоты перехода на них), генератор (поз. 1) со встроенным автоматом регулировки уровня и блоком качания частоты выдает управляющий сигнал на усилитель мощности 3, и, далее на вибратор 4, возбуждающий колебания изделия 5. Одновременно с генератора 1 сигнал поступает на вспомогательный блок ZMO 100 (поз. 6), преобразующий его в опорный, необходимый для работы магнитографов 7 при построении на этапе обработки накопленных ими данных зависимостей частота-перегрузка. Сигналы с ВИП (поз. 8) через предусилители 9 поступают в селектор

10, где происходит сравнение их величины и канал с максимальным уровнем сигнала автоматически включается в цепь обратной связи через фильтр 11, при этом величина максимального уровня регистрируется самописцем 12. В целях обеспечения возможности анализа процесса возбуждения колебаний конструкции показания всех ВИП (поз. 8) системы управления постоянно записываются магнитографами 7. Вольтметры 13 типа 2426 предназначены для визуального контроля фактического уровня сигнала на входе в селектор 10.

Измерительная система АСИВ-3 имеет два функциональных уровня. На нижнем уровне, включающем в свой состав УВК СМ 1300 и УКБ-200, осуществляется сбор и запись на НДМ информации с 16-ти БИП с заданной дискретностью отсчетов.

Второй уровень построен на базе ПЭВМ серии РС/АТ с необходимыми внешними устройствами. ПЭВМ производит фильтрацию записанного сигнала (выделение основной гармоники) математическим фильтром на основе преобразований Фурье, вычисляет реальный уровень перегрузок, коэффициенты динамического усиления, а также строит зависимость максимального уровня перегрузки от частоты по всем ВИП, установленным на конструкции. Результаты эксперимента выдаются в табличном и графическом виде. Программное обеспечение АСИВ-3, кроме того, позволяет по результатам анализа АХЧ и наложенным на динамическое нагружение конструкции ограничениям рассчитать виброперегрузку (как функцию от частоты) для задающего датчика из условия не превышения допустимых уровней во всех режимах вибропрочностных испытаний.

Работа оператора, проводящего виброиспытания с использованием автоматизированных испытательных комплексов, обычно ведется с пульта управления испытаниями. Стандартный пульт содержит: предусилители (2626); вольтметры замера фактического уровня сигнала (2426); селектор выбора максимального уровня сигнала (5686); фильтр (2021); генератор (1047); устройства программного нагружения ЗН 0100. Кроме того, на пульт выводятся приборы контроля работоспособности всех составляющих вибростенда, для электродинамического стенда - это приборы для замера тока, напряжения, мощности усилителя, контрольные приборы системы охлаждения, работоспособности системы подмагничивания. Обычно на пульте устанавливается самописец уровня сигнала задающего датчика, а также дисплей УВК. Внешний вид пульта управления виброиспытаниями с использованием стенда ВЭДС 1000 представлен на фото [рис.6.42](#).

Одним из типовых представителей цифровых систем управления, измерений и анализа данных является система фирмы «Derritron» (Англия) DVC-500. Она предназначена для проведения виброиспытаний на гармоническую, широкополосную случайную вибрацию и ударные воздействия. Упрощенная структурная схема системы приведена на [рис.6.43](#).

Составляющий основу системы компьютер типа «Engineering Ltd System 90» обеспечивает выполнение широкого ряда функций, в том числе: выработка управляющего сигнала заданного уровня спектра во всем диапазоне частот в течение требуемого времени (программа испытаний задается с дисплея, пользователь может ввести до 32 пар значений спектральная плотность - частота);

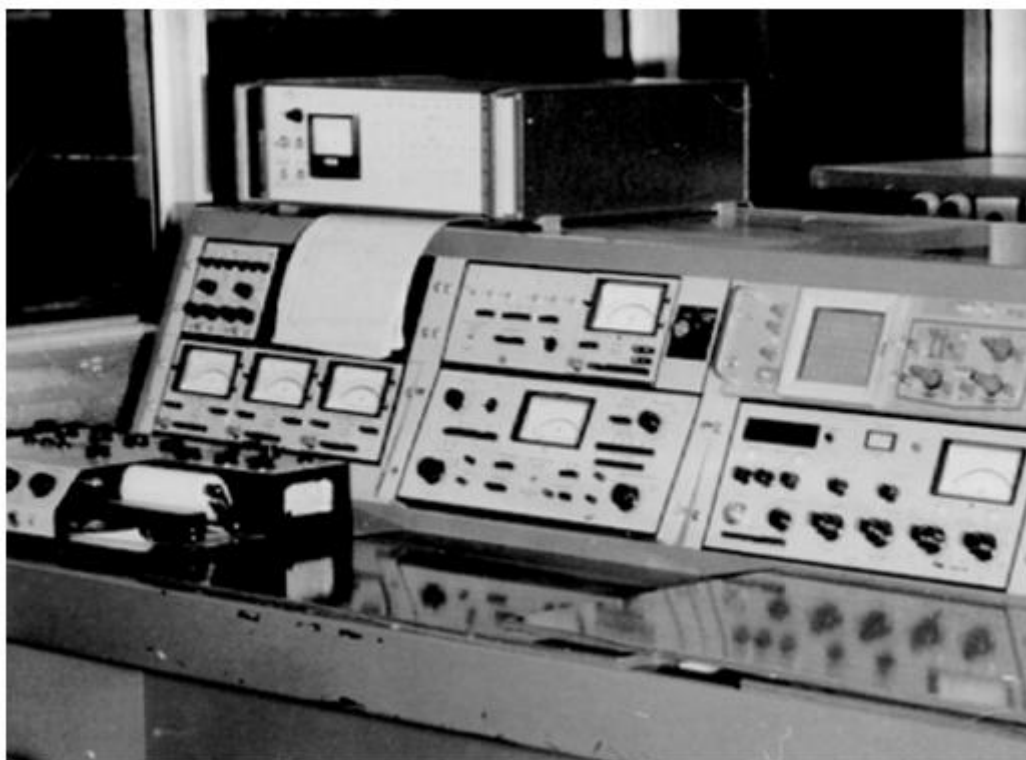


Рис. 6.42. Внешний вид пульта управления виброиспытаниями с использованием стенда ВЭДС 10000

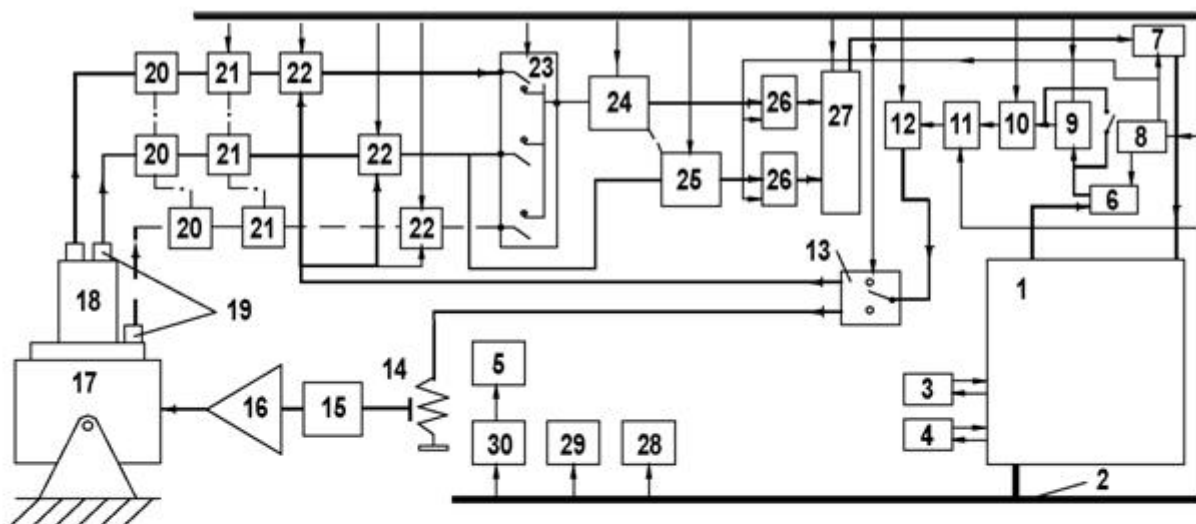


Рис. 6.43. Упрощенная блок-схема автоматизированной системы управления виброиспытаниями DVC 500

- 1 - компьютер; 2 - канал компьютера «общая шина»; 3 - графический выходной терминал; 4 - магнитофон; 5 - дисплей; 6 - ЦАП; 7 - АЦП; 8 - внешние часы; 9 - генератор синусо-идальных (регулятор мощности) колебаний; 10 - нормализатор; 11 - программируемый аттенуатор; 12 - фильтр; 13 - переключатель цепи управления; 14 - силовой потенциометр; 15 - согласующий усилитель; 16 - усилитель мощности; 17 - вибратор; 18 - изделие; 19 - ВИП; 20 - усилитель заряда; 21 - нормирующий усилитель; 22 - коммутатор; 23 - последовательный переключатель; 24 - полосовой фильтр; 25 - фильтр для анализа сигнала задающего датчика; 26 - устройства сравнения текущего и образцового сигнала; 27 - мультиплексор; 28 - блок индикации аварийных ситуаций; 29 - блок ручной блокировки процесса испытаний; 30 - часы прошедшего времени

контроль виброперегрузок по каналам измерений и обеспечение управления по датчику, зарегистрировавшему максимальный уровень возбуждения; анализ результатов измерений как во время испытаний, так и после его окончания; формирование программ испытаний как на случайную, гармоническую вибрацию, так и на ударное воздействие.

Программное обеспечение компьютера содержит программы формирования случайных чисел, генерирование «белого шума», быстрых преобразований Фурье как прямого, так и обратного, а также программы управления (формирования 400-полосного спектра, установки коэффициентов усиления фильтров, переключений, блокировок, индексации и ряд др.), программ анализа сигнала (длинных записей, коротких записей, колебаний).

Не останавливаясь подробно на работе системы, отметим основные ее положения. Процесс испытаний разбивается на стадию подготовки и стадию выполнения программного режима. На первой стадии переключатель цепи управления 13 (см. [рис.6.43](#)) через коммутатор 22 замыкает управляющий сигнал непосредственно на процессор компьютера. Вибратор 17 находится в состоянии готовности к включению, ВИП 19 выключены из работы. В таком состоянии производится установка заданной конфигурации зависи-

мости спектральной плотности от частоты на уровне настройки системы. При этом компьютер из создаваемого специальной программой «белого шума», программой быстрого преобразования Фурье формирует 400-полосный спектр, производит регулировку полосовых фильтров в соответствии с программным образцом, далее, после обратного преобразования Фурье, выдает выходной сигнал на цифро-аналоговый преобразователь. Этот сигнал через нормализатор 10, программируемый аттенюатор 11, фильтр 12, систему коммутаторов 22, последовательный переключатель 23, полосовые фильтры 24 ^{*}), устройства сравнения текущего и образцового сигнала 20 и мультиплексор поступает в АЦП (поз. 7) и в цифровом виде возвращается в процессор компьютера. После получения информации об установленном режиме, и по команде оператора срабатывает переключатель 13 и происходит подключение согласующего усилителя 15, усилителя мощности 16 и ВИП, расположенные как на столе вибратора, так и на изделии. Сигнал от ВИП через усилители заряда 20 и нормирующие усилители 21, коммутаторы 22 поступает в последовательный переключатель 23, а далее по цепи, описанной выше.

В ходе эксперимента управление вибратором ведется по одному задающему датчику с учетом ограничений, которые накладываются на показания остальных. Повышение уровня нагружения осуществляется поэтапно после анализа результатов возбуждения конструкции.

Необходимо отметить, что ПО системы обеспечивает управление не только по максимальному уровню возбуждения, но и по «максимальной конфигурации» спектра. То есть, производится анализ спектра, получаемого по всем (8 штук) датчикам, для каждой спектральной линии выбирается наибольший уровень и формируется суммарный спектр, который сравнивается с программным.

Система DVC 500 может выполнять измерения как амплитуды, так и фазовых передаточных функций в отдельных точках конструкции, а также находить функции связи между ними.

В отдельных случаях при вибрационных испытаниях производятся тензометрические измерения, которые осуществлялись аналоговыми тензостанциями ЛХ-7006, ПСП-1. Однако в последние годы стали активно использоваться и цифровые системы, одной из них является система регистрации тензометрических данных «Сигма-МКД» разработки НТЦ «ЭЛИС» НИАТ.

От аналогичных по назначению систем «Сигма-МКД», как и вышерассмотренная ИИС статических испытаний «Сигма-МК», отличается возможностью распределения измерительных модулей,

объединяемых цифровыми каналами связи, по поверхности объекта испытаний или в непосредственной близости от тензометрических датчиков. Это свойство позволяет исключить протяженные линии связи датчиков с измерительными преобразователями, выполняемые с использованием специализированного измерительного кабеля, и на этой основе в несколько раз уменьшить стоимость и трудоемкость развертывания системы при испытаниях. Также значительно возрастает и защищенность процесса измерений от электромагнитных помех.

Система включает в себя управляющую рабочую станцию на базе PC-совместимой вычислительной платформы с операционной системой Windows XP, корневой контроллер сети, обеспечивающий преобразование коммуникационного интерфейса USB в интерфейс RS485 (сетевой интерфейс системы), и набор из восьми сетевых измерительных модулей РСМ8-1М, обеспечивающий процесс преобразования изменения сопротивлений тензодатчиков в передаваемые по сети цифровые сообщения.

Технические данные системы:

Количество измерительных каналов	64	
Разрядность аналого-цифрового преобразования		24
Длительность цикла измерений по всем каналам мкс		1
Напряжение питания тензомостов	5 В	
Частота питания тензомостов	до 1,28 КГц	
Минимальное сопротивление четвертьмоста	120 Ом	
Минимальный диапазон измерения	1- мВ	
Температурный дрейф нуля (тип.)	5 нВ/°С	
Временной дрейф нуля (тип.)	25 нВ/1000 час	
Параметры цифровой фильтрации руемые		программи-
Полоса пропускания (-3 дБ, максимальная)	400 Гц	
Подавление помехи общего вида с частотой 50 Гц	120 дБ	
Автокалибровка нуля и диапазона граммная	про-	
Скорость передачи данных (мин/макс)	115200	бод,
1382400 бод		
Напряжение питания модулей	6,5...15 В	
Пиковый ток потребления при четвертьмостах	120 Ом	110
мА		
Габариты 8-канального модуля (без присоединительных разъемов), не более	150x120x25 мм	
Масса модуля (без присоединительных разъемов), не более	70 г	
Исполнение	IP44	
Рабочий диапазон температур	10...40 °С	

Сбор и регистрация измерительных данных производится программой SigmaMKD.Exe, запускаемой по обычным правилам операционной системы Windows. Собранные данные записываются на твердый диск с именем, содержащим число, месяц, год, час, минуту и секунду начала регистрации. Максимальная длина файла ограничена величиной 100 Мбайт.

Сохраненный файл измерительных данных состоит из записей фиксированной длины, равной 80 байт. Запись соответствует одной миллисекунде регистрируемого процесса. Каждая запись начинается с индекса текущего времени, выраженного в целых миллисекундах в виде четырехбайтного целого числа, за ним следует отсчет опорного (частотозадающего) канала в виде пары байт, младший из которых содержит восьмибитный отсчет канала, а старший всегда равен нулю. Далее следуют отсчеты всех 64 изме-

рительных каналов модулей в виде двухбайтных целых чисел. Первый из них является текущим отсчетом первого канала модуля с номером ноль, далее следуют аналогичные отсчеты остальных каналов этого модуля по возрастанию номеров. Затем структура повторяется для модуля с номером один и далее по возрастанию номеров модулей. Если модуль в данную миллисекунду не ответил или вообще не использовался в процессе сбора данных, то на месте отсчетов всех каналов этого модуля записываются нули.

Система «Сигма-МКД» предоставляет средства импорта полученных данных в одну из сред математической обработки и отображения данных - систему «MatLab», являющуюся в настоящее время стандартом для целей обработки полученных экспериментальных данных.

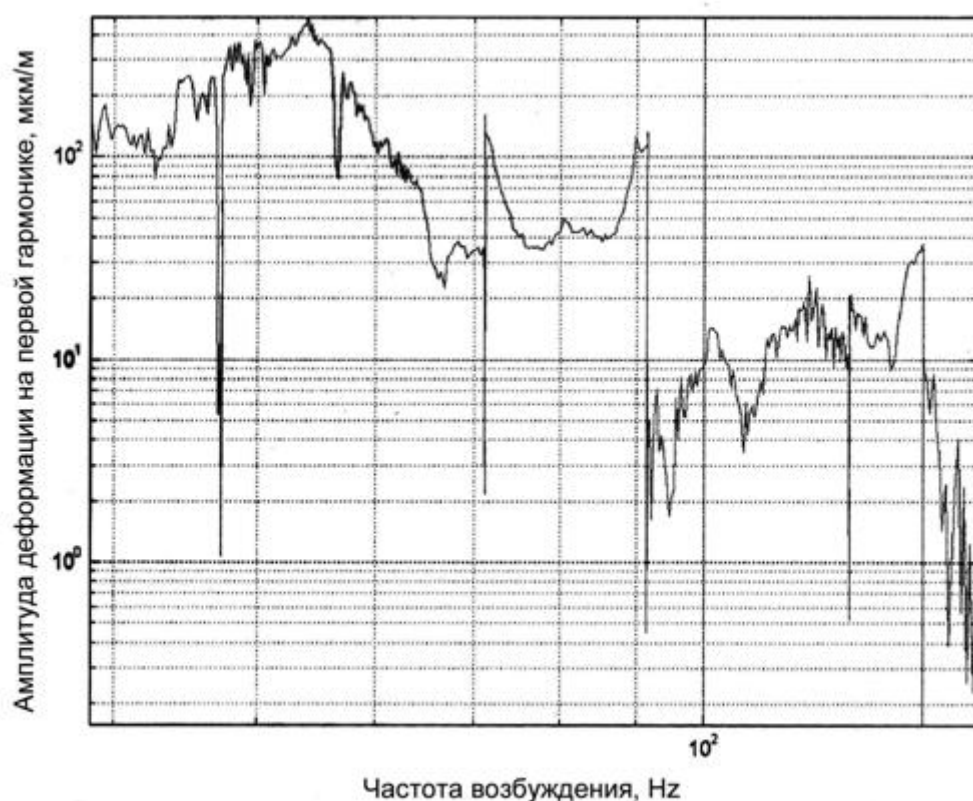


Рис. 6.44. Типовой вид записи зависимости приложенная частота возбуждения – амплитуды деформации на первой гармонике

С этой целью в состав программного обеспечения системы включены две программы, написанные во внутреннем для «MatLab» языке программирования. С точки зрения «MatLab» оба программных файла являются М-файлами типа процедур (а не функциями) и не требуют какого-либо задания входных переменных. На [рис.6.44](#), [рис.6.45](#) показано отображение тензометрической информации, полученной в ходе вибрационных испытаний оболочки с использованием ИИС «Сигма-МКД» и МО «MatLab».

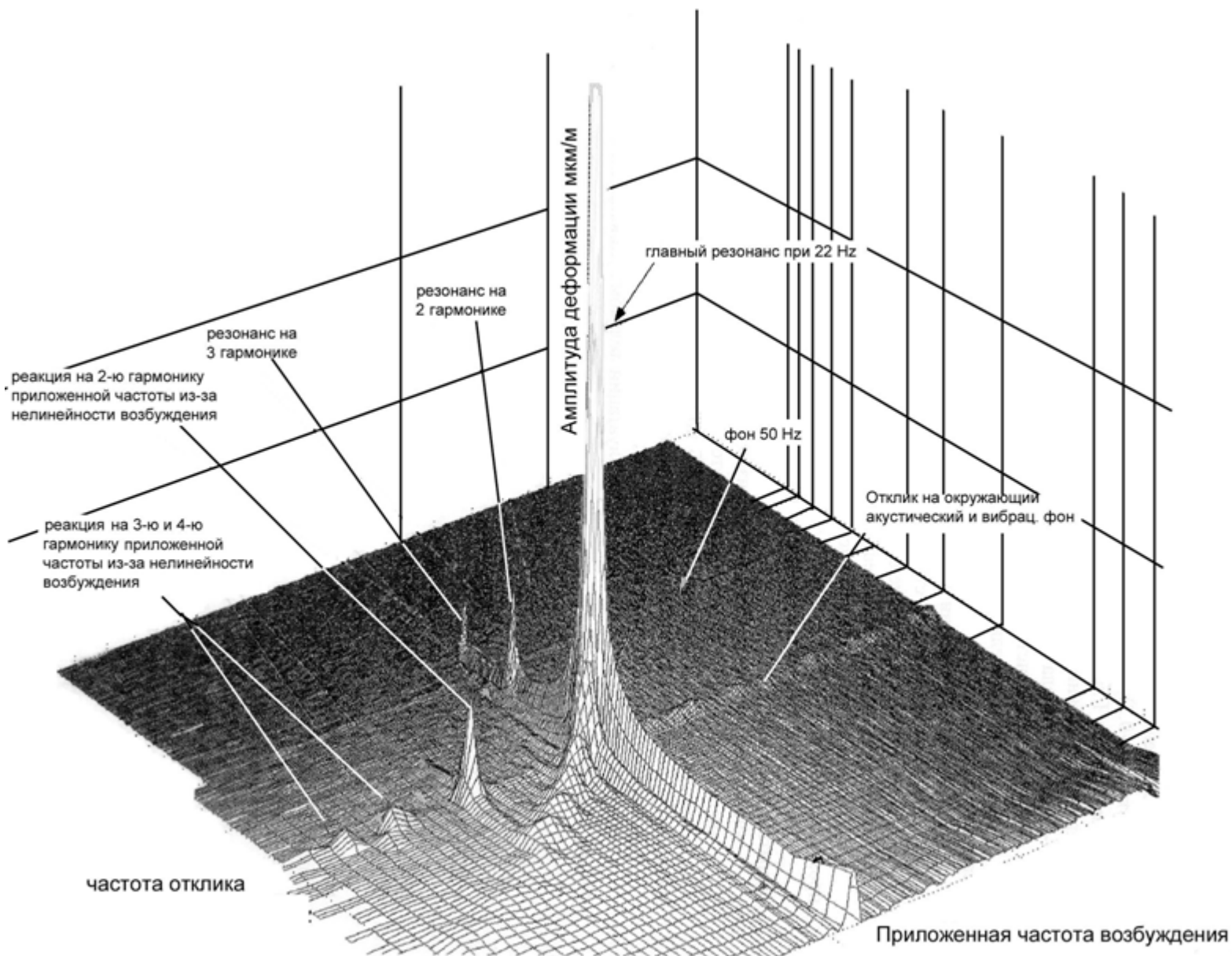


Рис. 6.45. Спектр деформаций пластины, полученный 24-битным «Сигма-дельта» АЦП:
 частота возбуждения 4...120 Гц; скорость сканирования 0,5 окт/мин; частота съема данных 1000 Гц;
 четвертьмостовая схема измерения деформаций; фильтрация данных низкочастотным F/R-фильтром

ГЛАВА 7. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ ВИБРАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

7.1. Общие положения неразрушающих вибрационных испытаний

Понятие неразрушающих вибрационных испытаний (НВИ) до последнего времени не нашло широкого распространения в практике конструкторско-прочностной отработки механических систем. Однако, именно этот тип виброиспытаний наиболее перспективен при исследованиях дорогостоящих, сложных изделий, в частности, конструкций КА, не санкционированное разрушение которых как в целом, так и отдельных узлов и агрегатов недопустимо из-за невозможности восстановительного ремонта и доработок.

Разрушение изделия или его частей, как правило, ведет к поломкам системы подвески стола вибростенда и устройств вывешивания изделия, предотвратить которые значительно сложнее, чем поломки силовозбудителей и нагружающей оснастки при плановых разрушающих статических испытаниях. Если при НСИ важнейшей проблемой является прогноз критических нагрузок исчерпания несущей способности конструкции, то при НВИ необходимо решать задачу прогноза (или экспериментального определения) резонансных частот и своевременного предотвращения резонансного роста амплитуд колебаний изделия. Чаще эта задача решается в два этапа: на первом этапе определения АХЧ конструкции находятся ее резонансные частоты; на втором - непосредственно в ходе испытаний - системой управления вибростендом осуществляется ограничение перегрузок до заданных программой уровней во всем диапазоне частот вибровозбуждения.

Далее безаварийное проведение виброиспытаний определяется следующими условиями:

- качеством моделирования исследуемой конструкции с целью теоретического определения собственных частот и форм ее колебаний;
- качеством входного контроля изделия, включающего контроль материала изделия, технологию его сборки, а также сборки переходных приспособлений и систем вывешивания;
- количеством и чувствительностью измерительных средств для определения как виброперегрузок, деформаций, возникающих в конструкции, так и ее перемещений (в особенности, при испытаниях маложестких конструкций);
- быстродействием и надежностью системы управления виброиспытаниями;
- применением вибраторов достаточной (избыточной) мощности для предотвращения роста амплитуд колебаний изделия в зонах резонансных частот;
- наличием совершенной системы контроля и блокировок всех составляющих элементов вибростенда для предотвращения их перегрузки, сбоев, нештатных отключений.

Кроме вышеназванных условий надежность проведения виброиспытаний неразрушающим методом может быть повышена путем внедрения нетрадиционных способов контроля состояния изделия, например, термовидения. Известно, что в местах концентрации напряжений при воздействии знакопеременных нагрузок повышается температура. Современные инфракрасные системы позволяют бесконтактно регистрировать изменения температуры с точностью до $\pm 0,03^{\circ}\text{C}$. Замер и компьютерный анализ температурных полей на поверхности изделия или в наиболее ответственных его зонах повышает надежность прогноза момента разрушения конструкции за счет накопления повреждений, от усталостных явлений. Помимо термовидения при НВИ могут быть использованы оптико-геометрические, голографические и другие методы исследования вибраций [28,70].

Как и НСИ, неразрушающие вибрационные испытания не требуют разработки особых методик. Эти испытания, как правило, проводятся методом качающейся частоты, либо методом испытаний на широкополосную случайную вибрацию с применением специальных автоматизированных испытательных комплексов и выполнением вышеприведенных условий.

ГЛАВА 8. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ КА

В настоящей главе рассмотрены виды прочностных испытаний, условно отнесенные к специальным.

Виброакустические, ресурсные, ударные, криогенно-статические испытания могут проводиться на стадии ЛОИ и определяются целями, конструктивными особенностями КА и типом носителя, выводящим его на орбиту. Изучение упругого изделия и распределение в конструкции тепловых полей необходимы для правильной оценки характеристик динамической схемы изделия и его прочности при воздействии теплосмен, присущих условиям эксплуатации. Определение влияния условий транспортирования на прочность конструкции КА и работоспособность аппаратуры также является необходимым требованием к его разработке.

8.1. Испытания на «транспортабельность»

Как указывалось выше (см. таблицу 1.1), под испытаниями на «транспортабельность» понимают как проверку прочности конструкции КА при транспортировании различными видами транспорта, работоспособности комплектующих после транспортных воздействий, так и отработку контейнера КА и его узлов.

В связи с тем, что условия транспортирования изделий РКТ железнодорожным, автомобильным, авиационным транспортом весьма жесткие ввиду явно выраженной нестационарности прилагаемых динамических нагрузок и высокого их уровня, разрабатываются специальные транспортные контейнеры. Они оснащаются весьма сложными системами демпфирования колебаний (включая механико-гидравлические с автоматизированным регулированием выходных характеристик), системой терморегулирования и пыле-влаго защиты [56]. Расчетным и экспериментальным путем производится оценка собственных форм и частот колебаний контейнера с целью определения оптимальных мест установки ложементов изделия, проверяется прочность узлов фиксации изделия.

Помимо обеспечения работоспособности контейнера в нем располагается аппаратура, контролирующая и фиксирующая на магнитную ленту перегрузки, воспринимаемые в ходе транспортирования самим изделием.

Комплексный план экспериментальной отработки изделия испытания его на воздействие транспортных нагрузок определяет как обязательные, однако, это не запрещает имитировать условия нагружения в лабораторных условиях.

В последние годы такой подход кроме преимуществ в расширении возможностей исследований изделия дает еще экономический эффект. Транспортные испытания могут проводиться по ускоренным программам с использованием жесткостных имитаторов контейнеров.

Наилучшим образом задача реализации транспортных нагрузок (в особенности, автомобильного и железнодорожного транспорта) решается с использованием электрогидравлических стендов, например, фирмы «Schенck». Система управления в таких случаях должна обеспечивать испытания на натурную вибрацию. Исходные данные для воспроизведения такого псевдослучайного процесса обычно получают при испытаниях прототипа в натуральных условиях. Воспроизведение натурной вибрации с заданной точностью на платформе имитатора контейнера несколькими пульсаторами является сложной задачей. Как правило, пространственное возбуждение заменяют на три однокомпонентных. Управление реализуется цифровыми АИК, работающими на базе аналоговых натурных записей, преобразованных к цифровому виду. На этапе выхода на установившийся режим произво-

дится корректировка программного спектра с учетом передаточной функции цепи вибратор - имитатор контейнера- система управления.

На фото рис. 8.1 представлен общий вид установки для проведения транспортных испытаний АКА в контейнере с помощью ЭГВУ фирмы «Schenck».

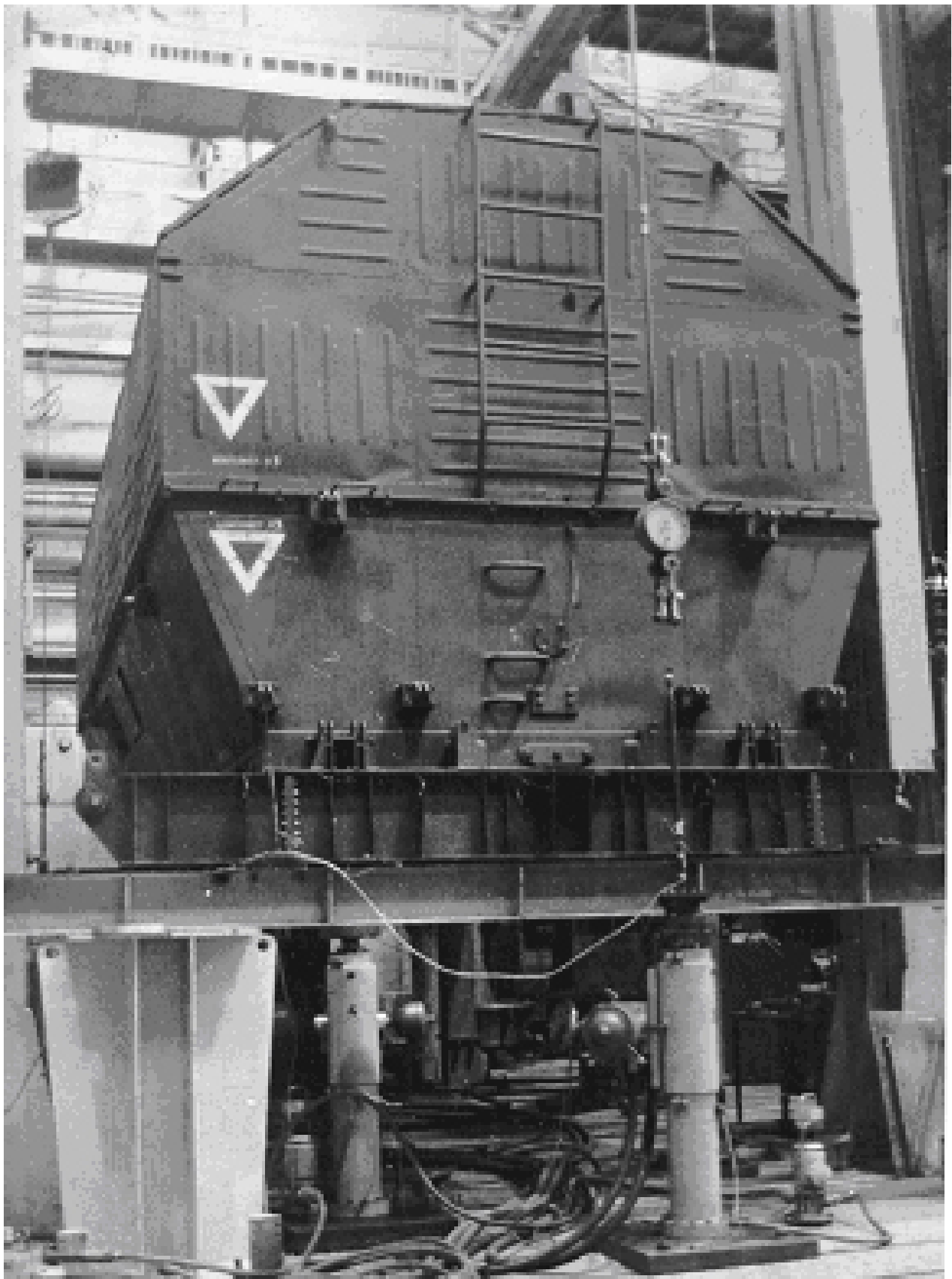


Рис. 8.1. Общий вид установки для проведения транспортных испытаний АКА в контейнере

8.2. Испытания «упругого» изделия

Испытания «упругого» изделия отнесены условно к прочностным в связи с тем, что одной из задач этих, как и динамических испытаний, является определение форм и частот свободных колебаний упругой конструкции в плоскостях стабилизации.

Достоверное знание декрементов колебаний конструкции АКА на частотах, влияющих на характеристики каналов стабилизации и ориентации, особенно важно для изделий, предназначенных для разномасштабного, многозонального наблюдения и фотографирования земной поверхности (изделия «Ресурс-Ф1», «Ресурс-Ф2», «Янтарь-2К» разработки ЦСКБ и др.).

Определение параметров свободных колебаний всей конструкции, а также колебаний, возбуждаемых, например, системой ориентации или приводами солнечных батарей и экранов системы терморегулирования производится, в основном, вышеописанными измерительными средствами, однако, зачастую реализация таких колебаний требует специальных испытательных средств.

Так, формы и частоты собственных колебаний АКА определяют путем приложения к верхней (конструктивно определенной, исходя из функциональных возможностей объекта исследований) точке штатно закрепленного по стыковочному шпангоуту изделия, направленной по заданной оси стабилизации и значительной по размеру (до нескольких кН) нагрузки с последующим ее «мгновенным» сбросом. «Мгновенный» сброс нагрузки осуществляется разрывом силовой цепи с помощью специальных многоразовых пневмомеханических («бомбовых») замков или пиросредств.

Для определения декрементов затухания и форм колебаний солнечных батарей и антенных устройств собирается установка, аналогичная используемой для виброиспытаний БС и АУ в раскрытом положении (см. рис. 6.35), однако, применяется не отдельный отсек, а жесткой имитатор всего изделия. Вибростендом возбуждаются возмущения, имитирующие работу исполнительных органов системы ориентации.

Неотъемлемой частью испытаний «упругого» изделия является анализ форм (мод) колебаний ^{*)}. Он состоит в выделении каждой формы колебаний изделия и в расчете обобщенных коэффициентов массы, жесткости и вязкости. Наивысшая возможная точность измерений может быть получена только тогда, когда на характеристики конструкции нет значимого влияния возбудителя и механизмов его крепления, и, наоборот, когда перемещения конструкции не влияют на возбуждающие силы. В связи с тем, что в действительности собственные частоты сложной конструкции могут быть очень близкими друг к другу, для их определения бывает необходимым возбуждение конструкции в нескольких точках и направлениях.

Как уже указывалось выше, для реализации многокомпонентного возбуждения и анализа форм колебаний конструкции может быть с успехом применена система фирмы PRODERA [54]. Она использует принцип получения параметров механической конструкции путем анализа ее реакции на несколько локальных возбуждений. Этот подход требует специальных технических средств, но он может очень быстро обеспечить нахождение нужной передаточной функции.

^{*)} В ряде источников [126] испытания «упругого» изделия называются модальными испытаниями. Истинная мода определяется как состояние вибрации, при котором все точки конструкции находятся в одной или противоположной друг другу и силе (силам) возбуждения фазе, при которой конструкция имеет одну степень свободы. Фактические (действительные) компоненты моды в привязке к схеме конструкции дают ее собственные формы колебаний.

Теория гармонических колебаний подразумевает, что идеального возбуждения можно достичь только при бесконечном числе сил возбуждения, которые должны быть очень точно размещены и отрегулированы.

Разделение форм колебаний, частоты которых очень близки, ведет к применению многоканального (2, 4, 8, 16, 32) оборудования для возбуждения конструкции в соответствии с ее сложностью, что позволяет проводить фазовую и амплитудную регулировку сил возбуждения.

Четырехканальная система - одна из наиболее удобных и простых в названном ряду. Эта система предназначена для достаточно простых конструкций и невысоких мод. В ней в линию возбуждения включен двухфазный генератор сигналов, питающий устройство регулировки общей силы, которое в свою очередь питает четырехканальное устройство раздельной регулировки усилий. Последнее управляет входным напряжением четырех усилителей мощности, которые приводят в действие четыре возбудителя электродинамического типа.

В канал анализа реакции входят: регистраторы движения точек конструкции; дисплей, позволяющий осуществлять одновременное отображение до 20 фигур «Лиссажу»^{*)}; аналоговые множители, дающие фактическую и мнимую компоненты зарегистрированных сигналов. Фактические компоненты, нарисованные XY-плоттером на схеме конструкции дают собственную форму, соответствующую моде.

При возбуждении колебаний конструкции эталонный сигнал генерируется синтезатором синусоиды с высокой четкостью и стабильностью частоты. Сила вибрации передается конструкции электродинамическими возбудителями, связанными с усилителями мощности. Использование усилителей с высоким выходным импедансом приводит к тому, что усилие каждого возбудителя пропорционально по амплитуде и фазе выходному току усилителя. Регулировка амплитуды и фазы усилия выполняется двумя специализированными приборами с цифровым управлением.

В цепи «измерение - регистрация – управление» приборами автоматического переключения сигналов можно обработать до 1000 фиксированных значений измеряемых параметров. Эти приборы имеют цифровые входы и выходы и анализируют все цифровые и аналоговые данные, идущие к ним или от них. Сигналы приемников анализируются для того, чтобы получить фактическую и мнимую части по отношению к эталонным сигналам. К приборам автоматического переключения сигналов можно подсоединять большое число периферийных устройств: самописцев, XY-плоттеров, принтеров и др. В целом управление системой в диалоговом режиме осуществляется компьютером типа Prin 80-III. Он имеет следующее основное программное обеспечение:

- определение мод конструкции при возбуждении белым шумом или широкополосным импульсным сигналом;
- назначение синусоидального многоточечного возбуждения и определение собственной моды;
- одноточечное возбуждение белым шумом или синусоидальным сигналом, аппроксимация передаточной функции рациональной функцией, определение собственных мод;
- возбуждение одно или многоточечным узкополосным импульсным сигналом, определение частот собственной моды и затухания.

^{*)} Фигуры «Лиссажу» - траектории движения точки на плоскости при различных соотношениях собственных циклических частот ее колебаний по двум взаимноперпендикулярным направлениям.

Цифровая система модального анализа фирмы PRODERA может наращиваться многоканальными приборами эталонного сигнала, дисплеем, клавиатурой, дисковой памятью и магнитофоном, что позволяет сформировать достаточно мощное средство получения, накопления и обработки данных.

8.3. Виброакустические, ударные и ресурсные испытания

Виброакустические испытания

Проблема акустической прочности и устойчивости появилась еще в 50-тых годах нашего столетия, когда был зарегистрирован уровень шума от работы ракетных двигателей, превышающий 150 дБ. Этот уровень был признан опасным для прочности панелей обшивки летательных аппаратов.

До 1% общей энергии, создаваемой современным двигателем, приходится на звуковую энергию. Звуковая энергия двигательной установки РН «Сатурн-5» с тягой 3400 тс составляет 2×10^5 кВт. Узлы двигателя, его стабилизатор, секции панелей, расположенные на расстоянии, равном нескольким диаметрам факела выхлопных газов, подвергаются пульсирующему акустическому давлению с уровнем до 170 дБ [140].

Главным отличием акустического воздействия от вибрационного является то, что первое зависит не только от уровня звукового давления, но и площади внешних панелей изделия, а второе передается на изделие главным образом через точки крепления двигателя.

Значительное влияние шума на динамические процессы в конструкциях относится к периоду старта и начальному участку траектории полета. С приближением скорости полета к околосвуковой влияние шума, создаваемого силовыми установками, снижается, и на этом участке пульсации акустических давлений достигают максимума, обусловленного иным фактором срывом потока. К этому же времени возрастает уровень акустических нагрузок, вызванных пульсациями давлений в турбулентном пограничном слое [140]. Условия акустического нагружения обшивки от воздействия турбулентного слоя наиболее неблагоприятны при полете в режиме максимального скоростного напора. Соответствующие уровни пульсаций звукового давления на конструкцию иногда превышают нагрузки, создаваемые силовыми установками.

Влияние шума аэродинамического происхождения существенно не только с точки зрения обеспечения прочности самой конструкции, но и его воздействия на внутренние компоненты и системы летательного аппарата, в частности, начинают вибрировать контакты реле и малогабаритные элементы аппаратуры, а также микросхемы и полупроводниковые элементы. Однако особое внимание необходимо обращать на участки обшивки в виде отдельных панелей и цилиндрических оболочек - характерных зон местного выпучивания подкрепленной конструкции. Совместное действие сжимающих нагрузок и акустического давления делает возможным неоднократные прощелкивания подкрепленных оболочек, что значительно ускоряет появление и развитие усталостных трещин [55]. Ряд исследований показал, что воздействие акустического давления в 170 дБ снижает несущую способность сжимаемых подкрепленных панелей, в среднем, на 7% [55].

В общем случае на участке выведения космического аппарата формирование вибраций его конструкции обуславливается как механической передачей колебаний упругого спектра непосредственно от силовых установок, так и вибрационного нагружения внешним давлением типа акустических воздействий. С точки зрения эффективной имитации этих воздействий в лабораторных условиях необходимы вибрационные и акустические испытания. Результаты исследований, свидетельствующие о значении акустических нагрузок в процессе виброн нагружения летательных аппаратов, отражены в работах [137,138,142,145,151].

Если низкочастотное вибрационное воздействие может быть обеспечено вышеописанными виброустановками, то акустическое воздействие необходимой мощности может быть создано в акустических реверберационных камерах.

Из опыта проведенных к настоящему времени исследований, в частности, акустических испытаний по программам «Сатурн-Аполлон», «Джемини», «Меркурий» [144] и ряда других аэрокосмических систем, вытекают следующие основные направления наземной отработки изделий РКТ в акустических камерах.

1. Испытания элементов конструкций, масштабных моделей и узлов крепления приборного оборудования для уточнения нагрузок с учетом акустического воздействия высокой интенсивности.

2. Испытания отсеков ЛА по проверке механической работоспособности узлов конструкции и функционирования различных элементов системы управления и аппаратуры.

3. Получение опытных данных по несущей способности подкрепленных конструкций при действии акустических нагрузок с целью выбора конструктивных параметров.

4. Усталостные испытания интенсивно нагруженных акустическими давлениями и статическими усилиями участков обшивки и узлов крепления приборов.

5. Определение технологических дефектов и конструктивных недоработок наиболее нагруженных узлов конструкции (сварных, заклепочных соединений и других зон концентраторов напряжений).

6. Проверка нормативных режимов виброн нагружения и режимов вибропередачи к агрегатам и приборам при одновременном действии вибраций, возбуждаемых механическими и акустическими методами, при высоком уровне звукового давления 170...180 дБ в диапазоне частот от 10 до 8000 Гц.

7. Выработка рекомендаций по внедрению неметаллических материалов и многослойных конструкций, обладающих высокими демпфирующими свойствами при действии акустических нагрузок.

Лабораторные акустические установки создаются с целью получения достоверных данных для последующей оценки прочности, долговечности, живучести и надежности изделий, подверженных воздействию пульсирующего звукового давления высокого уровня. Практические такие исследования осуществляются как с использованием натуральных источников акустического шума, так и реверберационных акустических камер.

Реверберационные камеры - это замкнутые помещения, в которых создается акустическое поле высокой интенсивности за счет резонансного усиления колебаний воздушной среды, возбуждаемых источником и отражением звуковых волн от ограждающих поверхностей.

Геометрические параметры и эксплуатационные характеристики реверберационных камер выбираются в соответствии с размерами испытуемых изделий, интенсивностью акустического нагружения, диапазоном рабочих частот звуковых давлений.

Известные отечественные и зарубежные камеры имеют объем 50...5000 м³.

В состав реверберационных камер входят следующие основные системы и устройства: испытательный бокс (камера); система генераторов звука (сирен); согласующие устройства (рупоры); система питания сирен сжатым воздухом; система формирования и управления спектрами акустической нагрузки; информационно-измерительная система; шумоглушитель для эвакуации рабочего тела сирен (сжатого воздуха); вспомогательные помещения [48].

Для получения большой равномерности акустического поля камеры объемом до 1000 м³ строят с непараллельными стенками, что способствует улучшению условий ре-

верберации звука. Угол скоса противоположных поверхностей друг относительно друга достигает 10° .

Для повышения диффузности больших (свыше 1000 м^3) прямоугольных камер применяют рассеиватели - жесткие клинья, устанавливаемые на внутренних поверхностях камер (см. рис. 8.2).

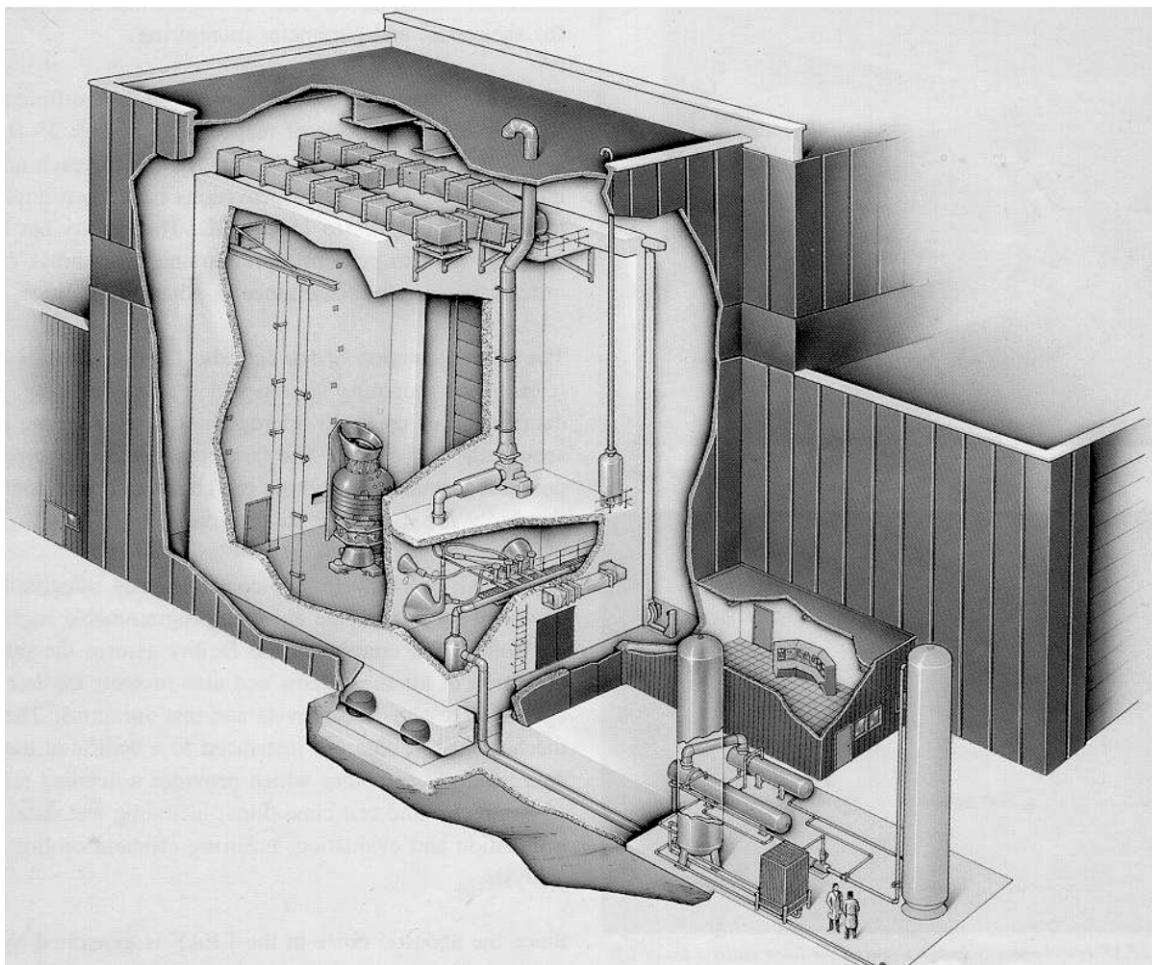


Рис.8.2. Общий вид реверберационной камеры для акустических испытаний аэрокосмических конструкций (центр в Тулузе)

Для получения уровня звукового давления в $155...160 \text{ дБ}$ в значительных по объему камерах требуется довольно большая акустическая мощность, исчисляемая десятками и сотнями киловатт. Для получения ее применяют генераторы звука, принцип действия которых основан на преобразовании кинетической энергии струи воздуха в акустическую энергию. Для получения заданной спектральной плотности акустического воздействия звуковые генераторы группируют по частотным полосам. Программное управление генераторами, формирующими спектр звуковых давлений, осуществляют с помощью многоканальных управляющих систем, структурная схема типического представителя которой [48] показана на рис. 8.3.

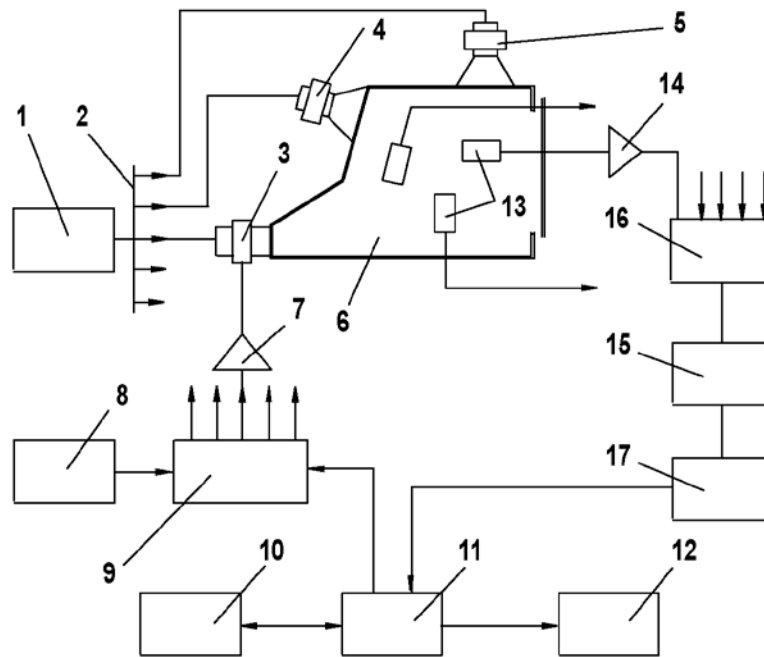


Рис. 8.3. Структурная схема многоканальной управляющей системы для реверберационной камеры:

1 - источник питания сирен сжатым воздухом; 2 – воздухо-распределительные 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 - микрофон; 14 - микрофонный усилитель; 15 - анализатор спектра; 16 - коммутатор, 17 - детектор

Исходный уровень звукового давления задается электропневматическим генератором белого шума 8, имеющим полосу частот 20 Гц...20 кГц. Из этой широкой полосы при помощи фильтров устройства 9 выделяют ряд 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 включенные усилители мощности генераторов звука - сирен 3, 4, 5, создающих акустическое поле в боксе камеры 6. Акустическая мощность генератора зависит от глубины модуляции воздуха и определяется в основном расходом и перепадом давления на входе и выходе модулирующего клапана. Поэтому в каждом генераторе предусмотрен независимый канал управления сжатым воздухом, включающий обычные для воздухо-распределительных систем устройства: электрозадвижку, дроссель, регулятор давления, воздушный фильтр, ресивер.

В качестве датчиков обратной связи в системе регулирования используют микрофоны 13, установленные в контрольных точках бокса.

Сигналы, поступающие с микрофонов 13, усиливаются усилителем 14 и после осреднения и прохождения через коммутатор 16 поступают в полосовой анализатор спектра 15, аналогичный по составу анализатору устройства 9.

После прохождения среднеквадратического детектора 17 уровни сигнала в полосах с помощью мини-ЭВМ сравниваются с заданными уровнями, в результате чего вырабатывается сигнал корректировки, поступающий на усилители задающих фильтров устройства 9, благодаря чему автоматически поддерживается уровень звукового давления в камере.

Важным исполнительным органом акустической камеры являются акустические генераторы. Отметим, что они разделяются на две основные группы: с дискретным спектром частот и с непрерывным широкополосным спектром. Первая, как правило, применяется для параметрических исследований выносливости элементов обшивки, вторая - для ресурсных испытаний.

По типу привода различаются генераторы с механическим приводом (сирены) и электропневматические преобразователи (модуляторы). Основным элементом сирен, генерирующим звуковые колебания, является вращающийся диск с отверстиями, установленный в струе воздуха, истекающего из сопла форкамеры. Частота звуковых колебаний зависит от частоты вращения диска (ротора), уровень звукового давления зависит от давления в форкамере. Отличие генераторов дискретного и широкополосного спектра заключается в том, что у последних не один, а несколько модулирующих дисков. Каждый диск имеет разное число и размеры проходных отверстий для воздуха. Отверстия по окружности располагаются с нерегулярным шагом, во вращение диски приводятся отдельными электродвигателями.

Высокочастотные электропневматические генераторы для создания высокоинтенсивных звуковых полей с управляемым широкополосным спектром частот построены на сочетании колебаний, возбуждаемых электромагнитной катушкой и модулируемыми в системе соосных сопряженных цилиндров со щелевыми отверстиями.

Низкочастотные звуковые генераторы большой мощности (например, разработанные фирмой Northron, США) в качестве привода обычно используют электрогидравлический вибровозбудитель, осуществляющий возвратно-поступательное движение головки модулирующего клапана, изменяющего по определенному закону параметры течения воздуха из форкамеры.

Завершая раздел виброакустических испытаний, необходимо отметить, что эти испытания, как правило, не являются обязательными для выдачи заключения о достаточной прочности космического аппарата. Учитывая исключительно высокую стоимость реверберационных камер и непосредственно испытаний, в ряде случаев конструкторы ограничиваются результатами уже проведенных исследований и успешно принимают необходимые меры по защите изделия от акустического воздействия, используя отработанные шумопоглощающие покрытия, панели и отражатели.

Ударные испытания.

Основная задача ударных испытаний - проверка способности изделия выполнять свои функции во время ударного воздействия и после него, т.е. сохранять свои основные параметры при ударном воздействии (и после него) в пределах, указанных в нормативных документах на изделие.

Космический аппарат в течение всего срока эксплуатации подвергается ударным воздействиям различного уровня, длительности и формы (спектра). Это: ударные воздействия, воспринимаемые КА при его транспортировании; удары при включении двигателей ракеты-носителя, расстыковке ступеней, сбросе головного обтекателя на активном участке полета; ударные воздействия, связанные с работой корректирующей двигательной установки, отстрелом отсеков, навесных элементов КА на орбитальном участке полета; включение тормозной двигательной установки, отстрел крышки парашютного люка, открытие парашюта, включение двигателя мягкой посадки, приземление спускаемого аппарата - на завершающем этапе полета.

На практике, обычно, реакция изделия на те или иные удары оценивается по результатам натуральных или близких к натуральным испытаниям. Так, при проведении транспортных железнодорожных испытаний динамического макета изделия записываются перегрузки, воспринимаемые им при движении платформы с контейнером на стыках рельсов и стрел-

ках, при подстыковке локомотива к составу и соударении вагонов. В случае транспортирования КА самолетом особое внимание уделяется режимам посадки.

Ударные воздействия от включения и выключения двигательных установок регистрируются и передаются на землю системой бортовой телеметрии КА. При оценке этих параметров большое значение имеет степень подобия разрабатываемого изделия и прототипа.

Отработка систем разделения створок ГО, приборных и агрегатных отсеков, навесных агрегатов (БС, панелей СТР, КДУ, антенны и др.) производится на натуральных макетах со штатными системами разделения (пирозамками, толкателями, удлиненными кумулятивными зарядами и др.) При проведении таких испытаний обеспечиваются необходимые условия нагружения (или обезвешивания) разделяемых агрегатов или отсеков, проводится замер ударных перегрузок, воздействующих на разделяемые части, ускоренная киносъемка движения объектов разделения, последующие исследования повреждений конструкции вследствие удара. Такие установки особенно необходимы и полезны при исследованиях надежности систем разделения и причин возникновения тех или иных аварийных ситуаций. Имитируется, например, несрабатывание одного из пирозамков или запаздывание выдачи сигналов на срабатывание пиросредств.

Отработка парашютных систем, влияние ударов, связанных с их работой на функционирование аппаратуры, размещенной в спускаемом аппарате (СА), и на его конструкцию в целом производится в ходе самолетных испытаний как над сушей, так и над водой.

Оценка ударного воздействия на конструкцию СА при ее приземлении осуществляется по результатам испытаний на копровых ударных стендах, которые позволяют достигать не только различной скорости соударения изделия и земли, но и имитировать различную жесткость грунта.

Важнейшей задачей натуральных ударных испытаний является не только оценка возможности сохранения работоспособности изделия после ударных воздействий, но и анализ получаемого спектра удара с целью обеспечения его демпфирования в дальнейшем.

Наряду с вышеописанным подходом к изучению и уменьшению ударных воздействий, которому в настоящее время отдается предпочтение, разработан ряд методов и стендов для лабораторных ударных испытаний. Как правило, они используются для отработки узлов, агрегатов, радиоэлектронных блоков.

В лабораторных условиях применяют три основных метода.

Первый метод заключается в точной имитации ударного воздействия в соответствии с условиями эксплуатации. Этот метод, как правило, требует создания специальных стендов для воспроизведения заданных характеристик ударного воздействия.

Второй метод - имитация реакции изделия на ударное воздействие, которое испытывает изделие в реальных условиях. Под реакцией обычно понимается ударный спектр или переходная характеристика. Однако, ударный спектр не определяет однозначно образом, как действует на объект изменение ударного ускорения во времени: различные ударные воздействия могут иметь один и тот же ударный спектр. Это дает возможность для формирования и воспроизведения заданного ударного спектра применять различные способы и оборудование. При формировании ударных импульсов классических форм (полусинусоидальная, пилообразная и трапецеидальная) наиболее распространен способ воспроизведения заданного ударного спектра на ударных установках с падающим грузом [17,77].

Успешно эксплуатируются установки, в которых в качестве ударника используется отклоненный от положения равновесия маятник [62], ударник может разгоняться вспомогательными устройствами [18], для повышения интенсивности испытательной нагрузки и обеспечения заданных временных характеристик процесса могут использоваться различные виды тормозных устройств [20,60].

Имитация реакции изделия на ударное воздействие часто может быть осуществлена на электродинамических вибростендах.

Правильный выбор пикового ударного ускорения и длительности ударного импульса позволяет с достаточной степенью точности аппроксимировать заданный ударный спектр. Однако, основным недостатком второго метода воспроизведения ударного спектра - перегрузка испытываемого объекта.

Третий метод имитации ударного воздействия в лабораторных условиях предусматривает воспроизведение ударного воздействия, которое вызывало бы в испытываемом объекте такие же повреждения, как и в реальных условиях эксплуатации. Этот метод трудно реализуем, однако, для анализа аварийных ситуаций в ряде случаев может оказаться единственно применимым.

Как указывалось выше, при проведении ударных испытаний одной из важнейших задач является моделирование ударных импульсов, которому предшествует анализ записей ударных процессов, полученных в ходе испытаний прототипов. Одним из наиболее распространенных методов получения частотных характеристик ударного импульса является так называемый «метод линейных гармонических осцилляторов».

Гармонический осциллятор – это одноступенная колебательная система, свободные колебания которой являются гармоническими. При воздействии на гармонический осциллятор внешней переменной силы $u(t)$ система будет совершать вынужденные колебания, которые описываются дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{\omega dx(t)}{Qdt} + \omega^2 x(t) = u(t), \quad (8.1)$$

где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота собственных колебаний осциллятора,

$$Q = \frac{\omega}{b} m = \frac{\omega}{b} - \text{добротность системы, } b - \text{обобщенный коэффициент вязкого трения}$$

(коэффициент сопротивления, $m = 1$ – масса осциллятора, $x(t)$ – координата смещения центра масс осциллятора относительно точки равновесия $x = 0$).

Решив уравнение (8.1), можно найти координату $x(t)$ смещения центра масс осциллятора в каждый момент времени. Первая ее производная даст скорость, вторая – ускорение колебаний. Совокупность максимальных значений ускорений собственных колебаний осцилляторов, возбуждаемых внешними воздействиями при заданных значениях собственных частот, называется ударным спектром.

Обычно используется ряд частот, установленный требованиями международной электротехнической комиссии (МЭК). Представим значения собственных частот этого ряда: 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000 Гц.

Для бортовой аппаратуры КА значение добротности, как правило, принимается $Q = 10$.

Расчет спектра удара производится численными методами. Рассмотрим наиболее распространенный из них – метод Рунге-Кутты 2-го порядка.

Преобразуем уравнение (8.1) для его решения численными методами. Для этого заменим производные от координаты $x(t)$ разностями, а возмущающее воздействие представим в виде числового ряда.

Пусть k – это точка, в которой ищется решение уравнения, тогда можно записать:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) \rightarrow u_k \\ \frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{x_k - x_{k-1}}{h} \\ \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \rightarrow \frac{\frac{x_{k+1} - x_k}{h} - \frac{x_k - x_{k-1}}{h}}{h} = \frac{x_{k+1} - 2x_k + x_{k-1}}{h^2} \end{array} \right. , \quad (8.2)$$

Для повышения точности расчёта применим к дифференциальному уравнению принцип Рунге-Кутты, то есть будем рассчитывать значения координаты не только в точках отсчётов последовательности u_k , но и между ними.

Обозначим координату, стоящую в пол шаге ($\frac{h}{2}$) позади x_k , как z_k , h – шаг дискретизации. Обозначим приращение координаты в точке z_k как: $v_k = x_k - z_k$, тогда соотношения (8.2) можно переписать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) \rightarrow u_k \\ \frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{v_{k+1}}{h \cdot \frac{1}{2}} = \frac{2 \cdot v_{k+1}}{h} \\ \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \rightarrow \frac{v_{k+1} - v_k}{h^2} \end{array} \right. \quad (8.3)$$

Перепишем исходное дифференциальное уравнение в виде конечных разностей

$$\frac{v_{k+1} - v_k}{h^2} + b \cdot \frac{2 \cdot v_{k+1}}{h} + \omega^2 \cdot x_k = u_k. \quad (8.4)$$

Выразим v_{k+1} через v_k , x_k и z_k :

$$v_{k+1} = x_k - z_k + v_k. \quad (8.5)$$

Подставим выражение для v_{k+1} в систему соотношений (8.3), тогда она приобретёт вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) \rightarrow u_k \\ \frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{2 \cdot v_{k+1}}{h} = \frac{2 \cdot (v_k + x_k - z_k)}{h} \\ \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \rightarrow \frac{v_{k+1} - v_k}{h^2} = \frac{v_k + x_k - z_k - v_k}{h^2} = \frac{x_k - z_k}{h^2} \end{array} \right. \quad (8.4)$$

Запишем окончательный вариант разностного уравнения:

$$\frac{x_k - z_k}{h^2} + b \cdot \frac{2 \cdot (v_k + x_k - z_k)}{h} + \omega^2 \cdot x_k = u_k. \quad (8.5)$$

Теперь можно найти решение исходного дифференциального уравнения, пользуясь рекуррентными зависимостями и уравнением (8.5). Из уравнения (8.5) определяем значение перемещения в точке k :

$$x_k = \left(u_k + \frac{z_k}{h^2} + \frac{(z_k - v_k) \cdot 2b}{h} \right) \cdot \frac{1}{\frac{1}{h^2} + \frac{2b}{h} + \omega^2}. \quad (8.6)$$

По формуле (8.5) находим значения v_{k+1} . Значения z_{k+1} находим по формуле:

$$z_{k+1} = z_k + v_{k+1}. \quad (8.7),$$

Ускорение гармонического осциллятора:

$$a_k = \frac{v_{k+1} - v_k}{h^2}. \quad (8.8).$$

Для решения дифференциального уравнения (8.2) зададим начальные условия в виде:

$$\begin{cases} v_0 = 0 \\ z_0 = \frac{u_0}{\omega^2} \end{cases}$$

Блок-схема алгоритма расчёта спектра удара приведена на рисунке 8.4.

Проиллюстрируем обработку записей ударного процесса. На рис. 8.5. приведена осциллограмма записи реального ударного процесса (срабатывание механизма фиксации контейнера научной аппаратуры на корпусе КА).

На рис. 8.5, 8.6 в качестве примеров приведены рассчитанные вышеописанным методом отклики гармонических осцилляторов с частотами соответственно 50 Гц и 125 Гц.

Полученные для всего ряда собственных частот амплитудные значения откликов позволили получить представленный в логарифмических координатах регулирующий ударный спектр ударного процесса по исходной записи (рис. 8.8).

Ресурсные испытания.

Активный участок выведения спутника на орбиту составляет сотни секунд, и в течение этого короткого времени даже за счет высокочастотных колебаний усталостные явления в конструкции КЛА не проявляются. На орбитальном же участке инерционные нагрузки, возникающие от эволюций движения КЛА, пренебрежимо малы. Однако, в последние годы за счет применения солнечных источников энергии и повышения ресурса работы электронных элементов аппарата резко, до десятков лет, вырос срок активного существования космических аппаратов. В связи с этим возникли проблемы длительного сохранения прочности в первую очередь механических систем. С другой стороны, появилась необходимость подтверждения так называемой длительной прочности герметичных отсеков, нагруженных внутренним давлением. Снижение прочности таких отсеков связано с явлениями ползучести материала, находящегося длительное время в нагруженном состоянии. Для применяемых в аэрокосмической технике алюминиевых сплавов коэффициент ползучести весьма высок [10,31].

Экспериментальные оценки ресурса механических систем обычно делаются на основании их вибрационных испытаний на фиксированных частотах, равных низким резонансным. При этом изделие (БС, АУ и др.) обезвешивается, а испытания проводятся до начала разрушения его конструкции. В ходе испытаний помимо перегрузок обычно измеряются напряжения и перемещения в наиболее опасных зонах конструкции. Полученное число циклов до разрушения конструкции ложится в основу расчета ресурса того или иного агрегата и КА в целом.

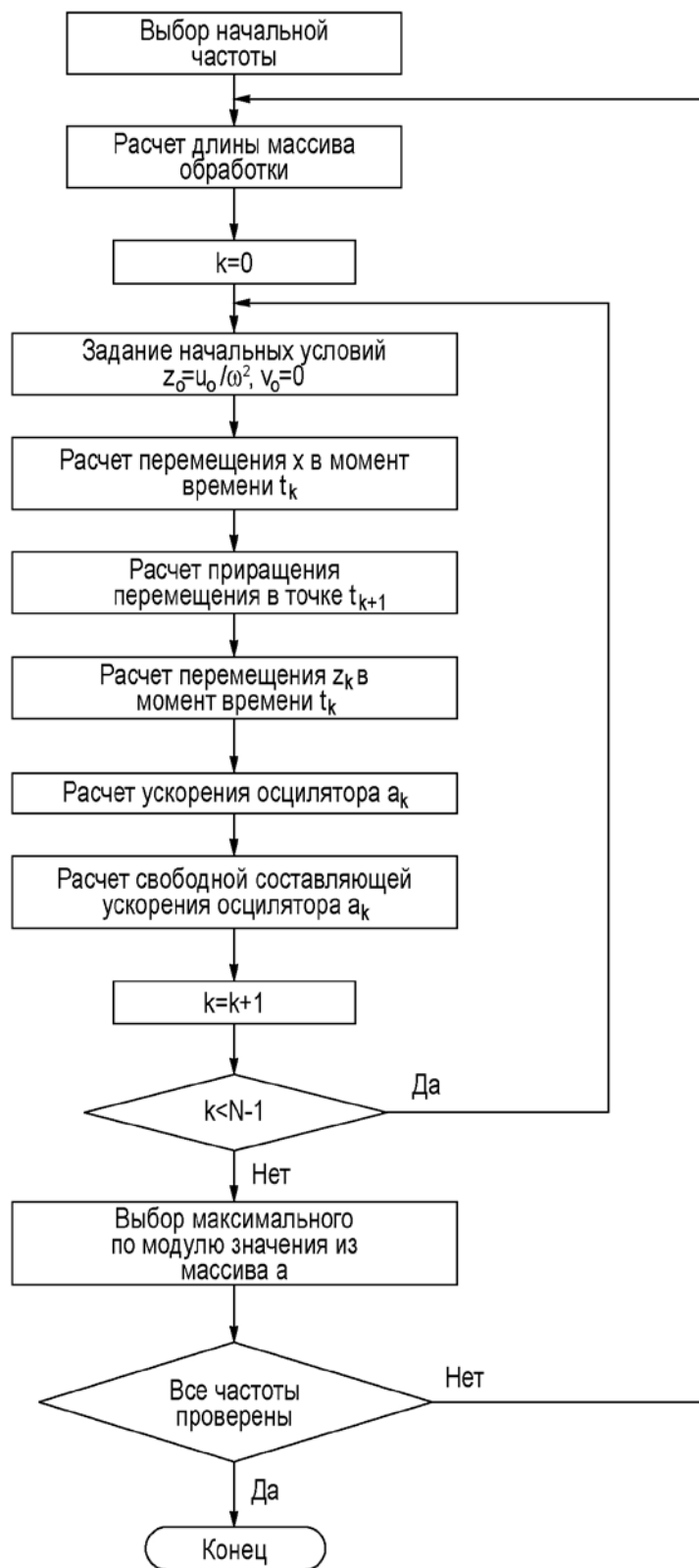


Рис. 8.4. Алгоритм расчета ударного спектра методом Рунге-Кутты 2-го порядка

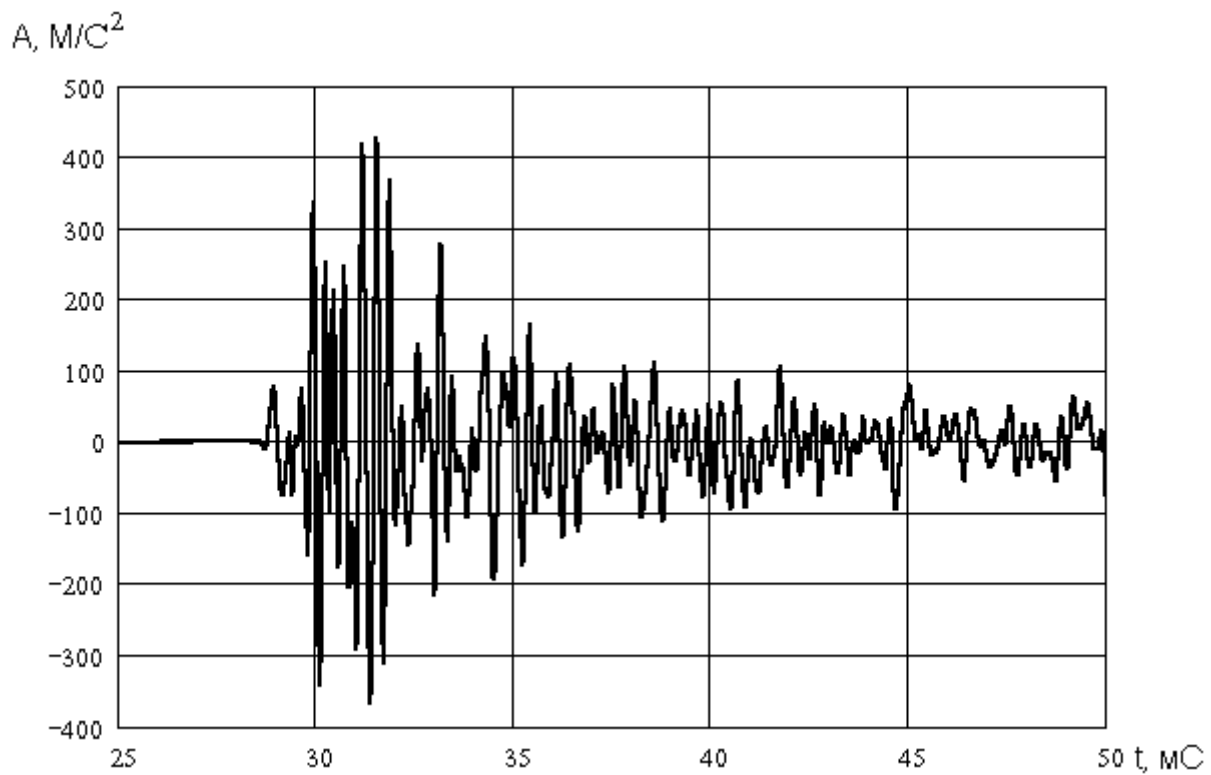


Рис. 8.5. Осциллограмма записи реального ударного процесса

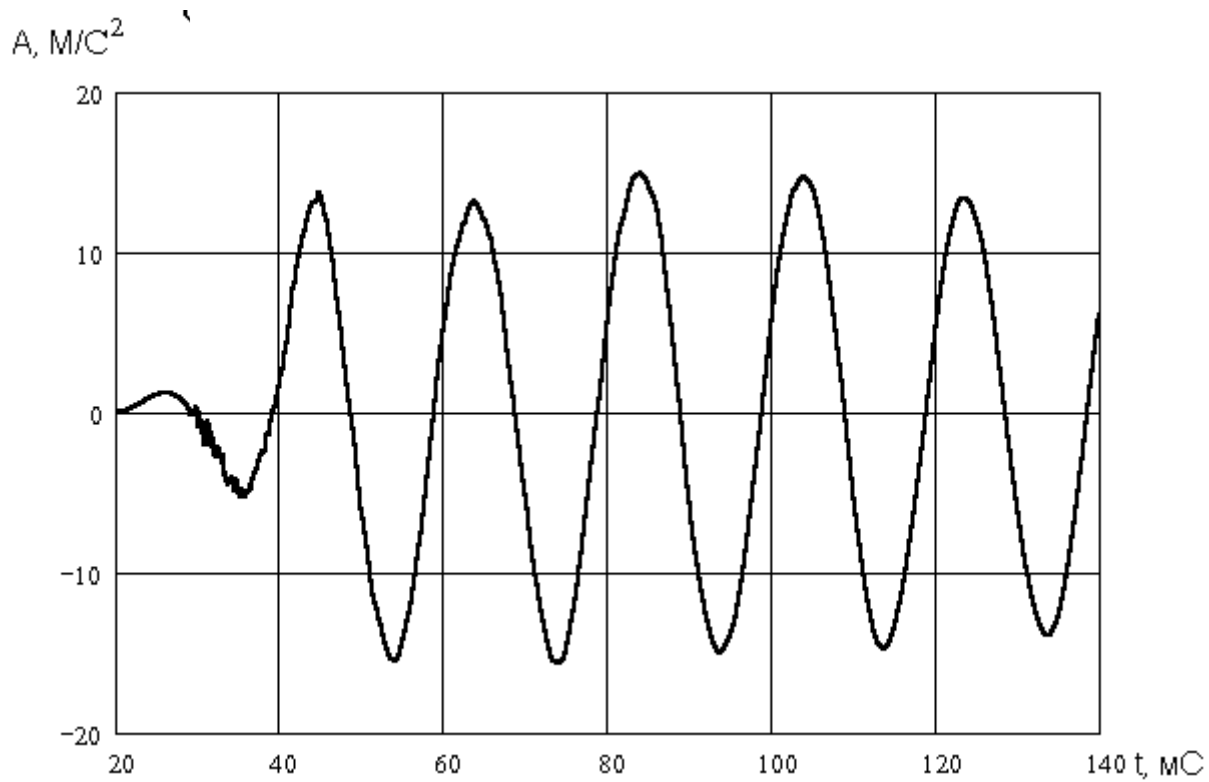


Рис. 8.6. Отклик гармонического осциллятора частотой 50 Гц

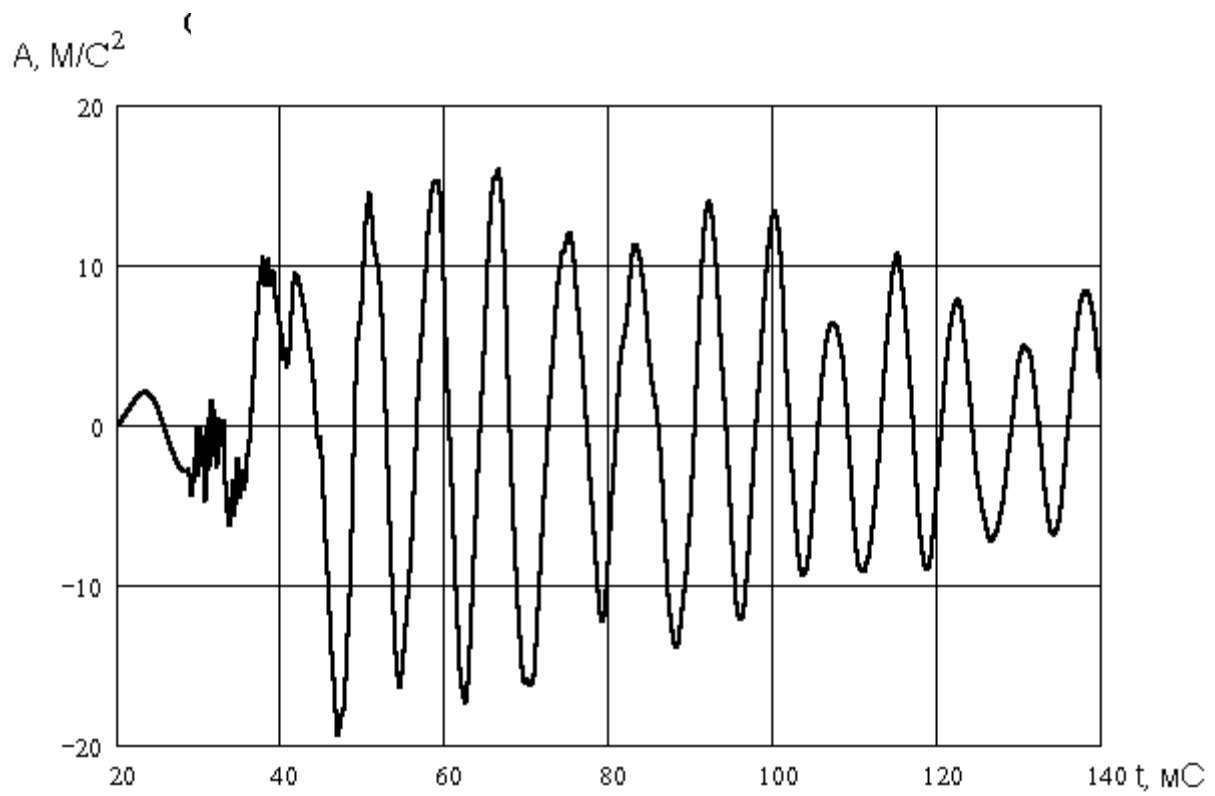


Рис. 8.7. Отклик гармонического осциллятора частотой 125 Гц

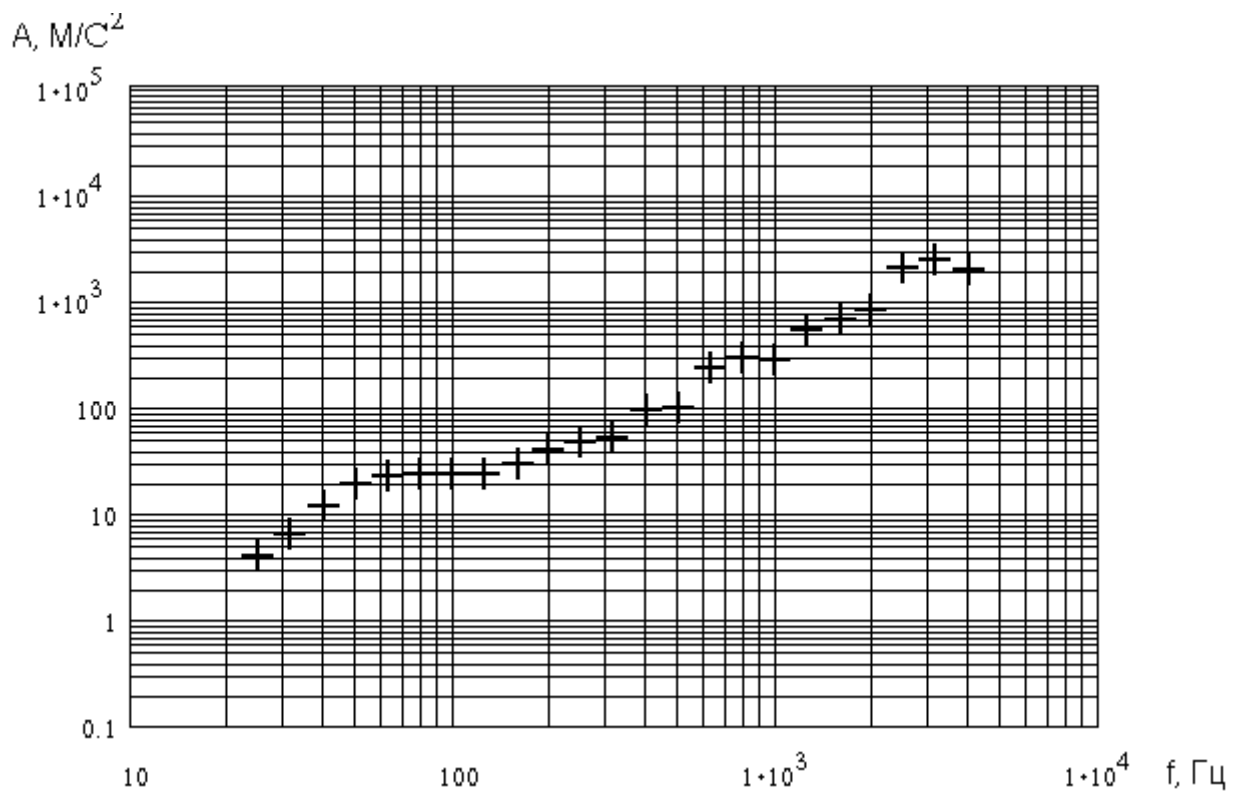


Рис. 8.8. Ударный спектр записи реального ударного процесса, представленного на рис. 9.5

Для оценок длительной прочности отсеков в последние годы используется прием их хранения в наддутом состоянии с периодическим контролем герметичности по спаду давления.

Ускоренных методов таких испытаний пока не существует. Учет длительной прочности конструкции производится теоретически путем недопущения в ней напряжений больших σ_{02} при максимальных нагрузках, возникающих в условиях эксплуатации.

8.4. Термопрочностные, криогенно-статические испытания

Конструкции ракет-носителей и космических аппаратов в процессе эксплуатации подвержены воздействию температур в самом широком их диапазоне от -150°C до $+5000^{\circ}\text{C}$. Нижний температурный предел определяется условиями космического пространства и применением криогенных компонентов топлива РН, а верхний достигается на поверхности теплозащиты спускаемого аппарата на баллистическом участке спуска.

Снижение механических свойств материала конструкции при высоких температурах, их повышение при низких учитывается при прочностных расчетах также, как и температурные деформации. Однако, прежде всего, принимаются конструктивные меры по обеспечению стабильности температурных полей в конструкции ЛА. Это достигается как применением системы терморегулирования, так и развитой пассивной теплозащитой спутника с помощью, например, экранновакуумной теплоизоляции.

Отработка системы терморегулирования изделия, измерение тепловых полей в его конструкции производится в термобарокамере на тепловом макете с использованием тепловых излучателей – «имитаторов солнца». В последние годы измерительные комплексы этих камер оснащаются системами для измерения деформаций.

Влияние высоких температур на конструкцию спускаемого аппарата оценивается с учетом тепловых характеристик теплозащиты, получаемых при ее огневых испытаниях на специальных установках.

Проблема проведения криогенно-статических испытаний элементов пневмогидросистемы (ПГС) и двигательной установки ЛА возникла при создании высокоэффективных двигателей на криогенных компонентах топлива. Наибольшее распространение получили два компонента: жидкий кислород и жидкий водород с температурами кипения при атмосферном давлении 90,2 и 20 К соответственно. Их низкие температуры кипения приводят к большим сложностям в создании ПГС и конструктивном исполнении экспериментальных установок [8,21,93].

Цель прочностных испытаний топливных баков и элементов ПГС двигательных установок заключается, прежде всего, в выявлении характера изменения механических свойств материалов с понижением температуры, который определяется следующими факторами: технологией изготовления, конструктивным исполнением, особенностями механического нагружения при эксплуатации. Отправной точкой исследований является тот факт, что с понижением температуры повышаются прочностные характеристики и снижаются пластические показатели большинства материалов.

Экспериментальные установки для испытаний на прочность криогенных топливных систем должны обеспечивать имитацию натуральных режимов термического и механического нагружения объектов испытаний.

В качестве примера представим (см. рис. 8.9) пневмогидравлическую схему ЭУ для испытаний модели топливного бака с ее разрушением после многократных термоциклических и механических нагружений [8,112].

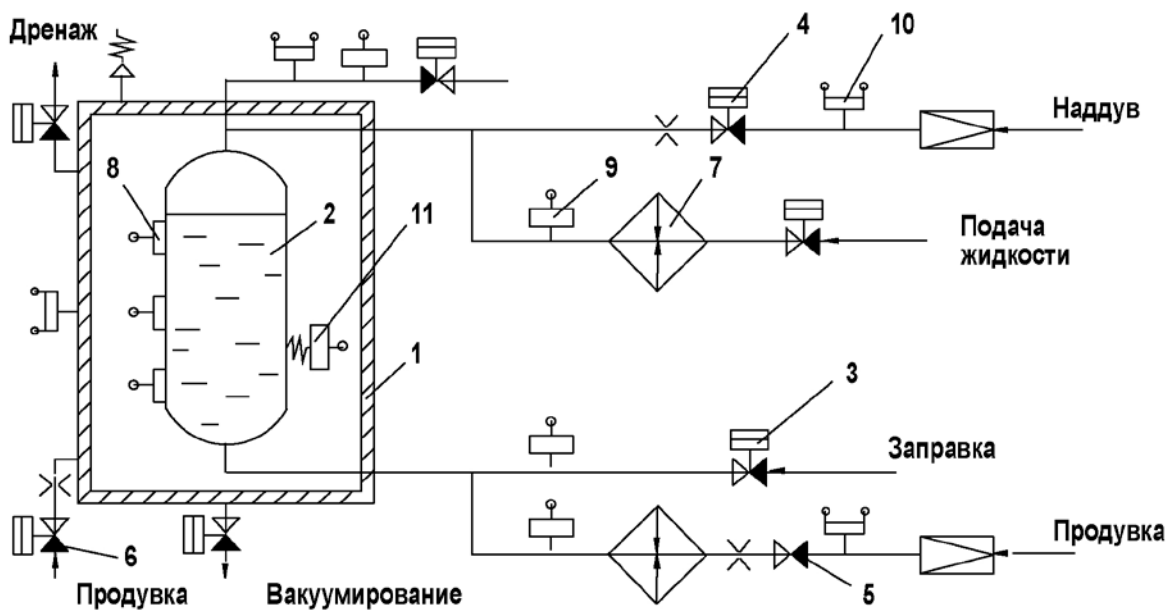


Рис. 8.9. Принципиальная пневмогидравлическая схема ЭУ для определения прочности топливного бака:

1 - бронезащитный кожух; 2 - модель топливного бака; 3, 4, 5, 6 - клапаны; 7 - теплообменник-термокомпрессор; 8 – датчик температуры бака; 9 - датчик температуры магистрали; 10 - датчик давления; 11 - датчик деформации

Установка работает следующим образом. Перед началом испытания в бронезащитном кожухе 1, в котором размещается модель топливного бака 2, создается разрежение до 100 Па. Захлаживание и заправку объекта испытания натурным криогенным рабочим телом осуществляют через клапан 3, затем через клапан 4 наддувают его неконденсирующимся газом до рабочего давления и выдерживают давление неизменным в течение заданного промежутка времени. В целях имитации в соответствии с программой испытаний термоударов и механического нагружения последовательно, несколько раз производят слив компонента, отогревают объект испытания до рабочего уровня температуры подачей газа в бак и кожух через клапаны 5 и 6, а затем проводят наддув объекта испытания до рабочего давления и необходимую выдержку. На последнем цикле термического и механического нагружения после заправки объекта испытаний криогенным топливом давление в нем повышают до наступления разрушения модельной емкости. Для случая, когда имеющейся на стенде величины давления газа наддува недостаточно, чтобы разрушить объект испытания, в схеме ЭУ предусмотрена подача криогенной жидкости через теплообменник-термокомпрессор 7. Он обеспечивает повышение давления за счет испарения криогенной жидкости и нагрева пара.

При испытаниях модели топливного бака эквивалентное натурному нагружение обечайки бака от действия внутреннего избыточного давления, продольной силы, изгибающего момента аэродинамического давления, поперечной силы, разницы нагрева смоченной и несмоченной частей бака имитируют только подбором величины испытательного внутреннего давления. При этом реализуют ожидаемые максимальные значения продольного и кольцевого напряжений. Применение же модели, конструктивно подобной натурному баку и сваренной по технологии, разработанной для натурального изделия, позволяет получить при испытаниях на ЭУ эквивалентное напряжение в материале с учетом упрочения при температуре криогенной жидкости и ослабления от сварки элементов конструкции. По величине испытательного давления разрушения модельной емкости и величине

деформации в момент разрушения определяют предельное значение напряжения для натурного бака, которое характеризует его прочность.

Принимая во внимание сложность технологии изготовления крупногабаритных баков для криогенных топлив, в ряде испытательных центров были созданы уникальные стенды для криогенно-статических испытаний полномасштабных топливных баков. Для реализации изгибающих моментов, осевых и перерезывающих усилий использовались гидравлические силовозбудители, передающие усилия к бандажам и силовым кольцам на изделия посредством тросов, размещаемых в теплоизолированных трубах.

Вообще говоря, важнейшими в проведении криогенно-статических испытаний являются системы обеспечения экспериментальной установки жидкими криогенными компонентами. Основной принцип конструктивного исполнения криогенного оборудования заключается в следующем: элемент конструкции, выполняющий свое функциональное назначение, охватывает герметичный кожух, свободное пространство в кожухе заполняется теплоизоляцией и вакуумируется. Конструкция в кожухе подвешивается на опорах - тепловых мостах, изготавливаемых из стеклопластиковых труб. Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) обычно выполняется из нескольких десятков слоев полиэфирной пленки с нанесенным слоем алюминия толщиной 5×10^{-4} мм для экранизации лучистого потока тепла. В качестве прокладок между слоями используются тонковолокнистые стекломатериалы. В условиях эксплуатации промышленных образцов криогенного оборудования с ЭВТИ теплоприток не превышает $1 \dots 2$ Вт/м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основы системной методологии исследования прочности и проектирования конструкций летательных аппаратов были разработаны в 70...80 годах прошлого столетия, как в нашей стране, так и за рубежом [66,67].

Общие положения системного подхода сформулированы М.Ф.Образцовым и Ю.И.Ивановым в работе [66].

Системный подход является общеметодологическим принципом организации исследований в том случае, когда они носят комплексный характер и связаны с применением решений в условиях, требующих анализа большого объема разнородной информации. Достаточная комплексность, сложная структура и высокая размерность математических моделей; наличие большого числа ограничений и требований к конструкции, носящих зачастую противоречивый характер; трудность формализации отдельных фрагментов проектирования и процесса принятия решений - определяющие черты задач прочности и проектирования КА, приводящие к необходимости применения при их решении системного подхода.

Структурно-системный подход содержит следующие компоненты: комплексный анализ, системное моделирование, системное управление (организация с использованием автоматизации) процессами исследований.

Целью комплексного анализа является построение математической модели, которая позволяла бы описать процесс деформирования конструкции и определить ее прочностные характеристики. Степень комплексности анализа, т.е. широты и глубины охвата факторов, влияющих на исследуемый процесс, можно оценить по следующим показателям: полнота учета внешних воздействий и реакции конструкции на них; степень детализации структуры и внутренних связей между элементами конструкции; полнота учета требований к состоянию и функционированию элементов, агрегатов и конструкции в целом.

На практике комплексный анализ представляет собой совокупность решений отдельных, порой слабо и односторонне связанных задач: определение расчетных условий эксплуатации и их нормирование, статический расчет, задачи статической и динамической

аэроупругости, динамическая реакция на нестационарные воздействия. В последние годы к этим задачам добавились задачи оценки экономической эффективности разработки. Ограничения, накладываемые этими задачами, в ряде случаев могут оказаться решающими.

Системное моделирование состоит в создании семейства согласованных имитационных моделей деформирования, основу которого составляет единая базовая модель. Эффективные (т.е. достоверные и экономичные) модели строятся путем многоуровневой декомпозиции (разделение по конструктивным и функциональным признакам) объекта исследований и применения комбинированных моделей.

Проблема оптимизации в рамках системной методологии характеризуется тем, что с самого начала она ставится и решается как многокритериальная. Ее практическое решение становится возможным только с использованием средств системного анализа: раскрытие неопределенности целей; установление иерархической структуры задачи, позволяющей свести ее решение к решениям последовательности более простых оптимизационных задач линейной размерности; имитационное моделирование, сочетающее использование формальных и неформальных методов принятия решений.

Эффективное решение задач прочности и проектирования КА возможно лишь на основе развития системного управления - широкой автоматизации процесса разработки изделия, предусматривающей: создание единой информационной основы (баз данных) с оптимизацией по критерию экономичности входной и выходной информации; алгоритмизацию всех процедур исследования как основных, так и вспомогательных; системную организацию математического обеспечения; наличие системы диалога исследователя с ЭВМ; организацию взаимодействия расчетной и экспериментальной автоматизированных систем.

Определим место экспериментальной отработки прочности КА в методологии системного подхода к проблеме его проектирования и обеспечения прочности.

Прежде всего, ее необходимость связана с невозможностью получения однозначного решения задач прочности при проектировании летательного аппарата с требуемыми тактико-техническими характеристиками. Далее, расчетные модели, даже наиболее совершенные, строятся на базе ограничений, определяемых только экспериментально. Необходимо, кроме того, оценка достоверности имитации внешних возмущений. Вносят свои погрешности технологии изготовления, как материалов, так и самой конструкции. В связи с особой сложностью методов оптимизации, результаты их применения также требуют экспериментального подтверждения. Комплексный анализ данных исследований невозможен без корректного сопоставления расчетных и экспериментальных данных с помощью ЭВМ.

С подробным описанием системы экспериментальной отработки прочности (СЭОП) РКТ можно ознакомиться в работе авторов [145]. В ней показано, что СЭОП ракетно-космической техники в целом, и автоматических космических аппаратов в частности, полностью удовлетворяет требованиям, определяющим большую техническую систему:

1. Большой технической системе соответствует структура СЭОП, имеющая ряд элементов, воспринимающих на входе внешнюю среду (исследуемая конструкция КА), процессоры (непосредственно испытательное оборудование, измерительные комплексы и т.д.), обеспечивающие выход (заключение о прочности, жесткости конструкции).

2. СЭОП реализуется посредством связей: внешние нагрузки \rightarrow программа испытаний \leftrightarrow оборудование; конфигурация конструкции КА \rightarrow измерительные средства; квалификация персонала \leftrightarrow производительность и т.д.

3. СЭОП обладает многоуровневой подсистемой управления, минимизирующей рассогласования между заданными и действительно реализованными выходами, управление системой на различных уровнях иерархии как посредством ЭВМ, автоматических устройств и машин, так и человеком.

4. СЭОП имеет единую целевую функцию - обеспечение высокой эффективности КА через достижение достаточной прочностной надежности конструкции. Эта целевая функция реализуется в некотором определенном множестве операций (различные виды испытаний, анализ результатов, оптимизация конструкции и др.) с наложением ряда линейных и нелинейных ограничений; поведение системы всегда характеризуется большей или меньшей функциональной неопределенностью, например, программа испытаний уточняется по ходу их проведения.

В теории и практике создания аэрокосмической техники в силу конкретности задач большее, чем понятие «большие технические системы», распространение, однако, получило понятие: «технические системы». Теория же технических систем (ТС) явилась одной из ветвей общей теории систем, которая призвана изучать характеристики любых по сложности и назначению систем.

Отбор идей, закономерностей и приемов для формирования теории технических систем, процесс становления теории в течение последнего полувека шел на базе проектирования наземных и космических летательных аппаратов (ЛА). Первые труды в этой области связаны с работами С.П.Королева (1945...1948 г.г.) и В.П.Мишина, в которых решалась задача проектирования оптимального ЛА на основе комплекса массовых, геометрических, баллистических и др. моделей. В книге Г.Х.Гуда и Р.Э.Маккола [151] была сделана первая попытка утвердить понятие системного (комплексного) исследования, а также структуризации и анализа связей в ТС. Авторы книги пришли к выводу о наличии в организационных ТС (ОТС) сложных переплетающихся непознанных связей. Исключительно важным и принципиальным следствием из системного рассмотрения любой ТС является положение о том, что критерий качества объекта должен соответствовать системам более высокого, чем он сам, уровня.

За прошедшее тридцатилетие благодаря упорным, длительным, коллективным усилиям была установлена система закономерностей, правил, методических приемов, логических и математических моделей, алгоритмов и программ. Она уже позволяет рассматривать теорию технических систем как оформившееся научное направление, обеспечивающее решение не только задач проектирования ЛА, но и создания большинства технических систем.

В частности, она может быть использована как базис для создания системы экспериментальной отработки прочности космических аппаратов.

Состояние теории технических систем, приводит к выводу, что интересующее нас направление исследований - система экспериментальной отработки прочности АКА, может быть рассмотрено в соответствии с ее методологией.

Так, основные понятия и определения отработки прочности РКТ достаточно четко сформулированы в 60-е годы XX столетия и отражены в нормативных документах отрасли. К общеизвестным источникам можно отнести работы Балабуха Л.И., Гладкого В.Ф., Грибанова В.Ф., Кармишина А.В. и др. [152...154].

Структура и связи системы экспериментальной отработки прочности РКТ исследовались в ЦНИИМАШ и ряде специализированных институтов и лабораторий. Однако детальная проработка структуры СЭОП АКА различного назначения, учитывающая специфику их конструкции, нашла свое отражение только в публикациях последних лет [155...157]. При этом под эффективностью будем понимать совокупность свойств, обеспечивающих достижение определенного эффекта при использовании предлагаемой СЭОП. Эффект может быть политическим, общенаучным, экономическим, техническим и др. Принципы экспериментальной отработки прочности, требования к реализующей их экспериментальной базе, структурная схема СЭОП, ее цели, критерии оценки эффективности подробно рассмотрены в работе [145]. Здесь же приведены классификация критери-

ев эффективности СЭОП, идентификация переменных, метод интегральной относительной оценки СЭОП.

Большое внимание уделено синтезу альтернативных вариантов развития и деградации СЭОП, решению оптимизационной задачи системы в условиях ограничений.

Проблема повышения эффективности экспериментальной отработки прочности КА вследствие ее комплексности чрезвычайно сложна и только последовательное решение отдельных ее задач дает реальный экономический эффект.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамович С.В., Гнатюк М.А., Дехтяренко П.И. и др. Многоканальная система управления моногармоническими виброиспытаниями // Вибростенды и возбудители колебаний: Труды IV Всесоюз. конф. по виброметрии.- Киев, КДНТП, 1969.- С.18-27.

2. Абрамович С.В., Дехтяренко П.И., Комаров Б.А. и др. Система управления виброиспытаниями с моногармоническим силовозбуждением, имитирующим случайный процесс // Кибернетика и вычислительная техника. - Киев, Наукова думка, 1974, вып.23. - С.137-142.

4. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике/ Под ред. К.Б.Ванара, М.: Атомиздат, 1980. -213 с.

5. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформированного тела. - М.: Наука, 1973. -576 с.

6. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. - М.: Машиностр., 1978. - 311 с.

7. Алфутов Н.А., Рубцов А.А. Экспериментальное определение критических нагрузок цилиндрических и конических оболочек// Тез. докл.IV Всесоюз. конф. по пробл. устойч. в строит. мех. - Харьков, 1972. - С.65.

8. Барсуков В.С., Бершадский В.А., Галеев А.Г. Экспериментальные установки и системы стендов для испытаний пневмогидросистем двигательных установок ЛА на криогенных компонентах топлива. - М.: изд-во МАИ, 1992. -79 с.

9. Белоусов А.И., Ткаченко С.И., Самсонов В.Н., Ткаченко О.А. Наземная прочностная и вибрационная отработка космических аппаратов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2002. -480 с.

10. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник/ 4-е изд.- М.: Машиностр., 1993. - 640 с.

11. Бовенко В.Н. Принципы автоколебательной теории прогнозирования разрушения твердых тел// Диагн. и прогноз. разруш. свар. констр.-1986. - N 3.- С.29-32.

12. Бодин Б.В., Алешин В.В., Каумен В.С., Перемогин Ю.А. Система обеспечения качества в России. Этапы создания и требования к процедурам //Качество ракетно-космической техники - 1994.- N 25.- С.42-49.

13. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций.- М.: Машиностр., 1984. - 312 с.

14. Вакулич Е.А., Варивода В.Д., Жуковский А.Е. и др. Методы обеспечения функциональной надежности пневмогидравлических и топливных систем блока ракетно-космического комплекса/ Под ред. В.П.Шорина и С.А.Петренко - Самара: НПО «Импульс», 1994.- 256 с.

15. Васильев Д.М., Трофимов В.В. Рентгеновская тензометрия как метод исследования напряженного состояния поверхностных слоев // Физ. и технол. обраб. поверхн. метал. - Л., 1984. - С.58-72.

16. Вест Ч. Голографическая интерферометрия / Пер. с англ. Под ред. Ю.И. Отр - Островского.- М.: Мир, 1982. - 504 с.

17. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. - 984 с.
18. Воробьев В.А. Стенд для динамических испытаний изделий // РЖ. Метрология и измерительная техника. - 1983.- N 12.
19. Воробьев В.А., Селиванова Г.А. Стенд для динамических испытаний изделий // РЖ. Метрология и измерительная техника. - 1983. - N 1.
20. Воробьев В.А. и др. Использование методов тензометрии для регистрации акустической эмиссии // Пробл. прочн.- 1982.- N 8. - С.126-128.
21. Галеев А.Г. Проектирование систем и оборудования стендов для испытаний двигательных установок ЛА.- М.: изд-во МАИ, 1990. - 67 с.
22. Гарф М.Э. Испытания на усталость применительно к задачам оптимизации конструкций.- Киев: Наукова думка, 1984. - 176 с.
23. Гейда Е.Г. К вопросу прогнозирования несущей способности конструкции // Расчет, констр. и испыт. машин в экстрем. условиях. - Днепропетровск, 1985. - С. 21-25.
24. Гейтманов А.Г. и др. Автоматическое управление вибрационными испытаниями. - М.: Энергия, 1978, вып. 579.- 112 с.
25. Генкин М.Л., Русанов А.И., Яблонский В.В. Электродинамические вибраторы. - М.: Машиностр., 1975. - 94 с.
26. Геометрические методы исследования деформаций и напряжений // Тр. Всесоюзного семинара. - Темат. сб. научных трудов. - Челябинск: ЧПИ, 1976. - N 182. - 188 с.
27. Гиренков В.В., Климонов О.П. Планирование и координация работ по исследованию прочности ракетных конструкций // Космонавтика и ракетостроение, 1995. - № 4.-С.118-125.
28. Годин Э.М. Пневмогидравлические насосные станции // Научно-технические достижения. - М.: ВИМИ, 1970. -N 1. - С.27-41.
29. Голографические неразрушающие исследования / Пер. с англ. Под ред. Р.К.Эрф. - М.: Машиностр., 1979. - 448 с.
30. Гольденблат Н.И., Копнов В.А. Об экспериментальной проверке критериев прочности анизотропных материалов // Пробл. прочн.- 1984.- N 3. - С. 88-90.
31. Гохфельд Д.А., Саданов О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях.- М.: Машиностр., 1984.- 256 с.
32. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. М.: Изд-во стандартов, 1976.- 272 с.
33. Грибанов В.Ф., Рембеза А.И., Голиков А.И. и др. Методы отработки научных и народнохозяйственных ракетно-космических комплексов/ Под ред. В.Ф. Грибанова. - М.: Машиностроение, 1995. – 352 с.
34. Грибанов В.Ф., Паничкин Н.Г., Крохин И.А., Санников В.М., Фомичев Ю.И. Прочность, устойчивость и колебание термонапряженных оболочечных конструкций. - М.: Машино-строение, 1969.
35. Гуд Г.Х., Маккол Р.Э. Системотехника. - М.: Советское радио, 1962.
36. Дель Г.Д., Новиков Н.А. Метод делительных сеток. -М.: Машинностр., 1979. - 144 с.
37. Джанкотов С.Д., Киреев В.А., Кулагин Н.Т. Экспериментальное и теоретическое исследование несущей способности продольно сжатых слабоконических оболочек из композитных материалов // Механ. композит. матер. - 1980.- N 6.- С. 1047-1055.
38. Добрынин С.А., Фельдман М.С., Фирсов Г.И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин: Справочник. - М.: Машиностр., 1987.- 224 с.
39. Дюрелли А., Парис В. Анализ деформаций с использованием муара / Пер. с англ. М.: Мир, 1974. - 359 с.

40. Египко В.Н. Организация и проектирование систем автоматизации научно-технических экспериментов. - Киев: Наукова думка, 1978. - 232 с.
41. Егоров А.А. Автоматизация технологических процессов лабораторно-стендовой отработки элементов и конструкций летательных аппаратов на основе шины VME. Тр. Межд. Конф. VERA+& VITA Vvconex 93. «VME/VXI bus в промышленности и научных исследованиях» 2-4 июня 1993 г., Москва.
42. Егоров А.А. Архитектура современных комплексов для автоматизации процессов экспериментальной отработки элементов и узлов летательных аппаратов. №1, 1995. -С.13-19.
43. Егоров А.А., Лопатин В.И. Выбор оптимальной глубины планирования в последовательных прочностных экспериментах. Тр.8 Всесоюзной конф. «Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях», сентябрь 1986 года. Ленинград.
44. Жилкин В.А. Исследование упругопластических задач методом голографического муара // Пробл. прочн.- 1984.- N 12.- С. 69-73.
45. Занин Ю.Г., Ключко В.А., Соболев А.Б. Стенды для виброиспытаний изделий в горизонтальной плоскости // Машины и приборы для измерен. механ. величин. Экспресс-информация. - 1975.- N 3.- С. 5-10.
46. Испытания материалов: Справочник / Пер. с нем. Под ред. Х.Блюменауэра.- М.: Металлургия, 1979.- 445 с.
47. Испытательная техника для исследования механических свойств материалов / Отв. ред. Г.С. Писаренко. - Киев: Наукова думка, 1984.- 318 с.
48. Испытательная техника: Справочник в 2-х книгах / Под ред. В.В.Клюева. - М.: Машиностр., 1982, кн.1.- 528 с., кн.2.- 559 с.
49. Исследование поведения несущей способности композиционных материалов и конструкций из них, используемых в качестве несущих элементов: Отчет о НИР / Днепропетровский гос.ун-т (ДГУ); Руководитель В.З. Грищак .- N 02820000960.- Днепропетровск, 1982.- 53 с.
50. Казачок А.Г. Вопросы автоматизации прочностных исследований на основе методов когерентной оптики и голографии // Автометрия. -1982.- N 4.- С. 45-50.
51. Кармишин А.В. и др. Методы динамических расчетов и испытаний тонкостенных конструкций. -М., 1989. - 283 с.
52. Кармишин А.В., Лиходед А.И., Сухинин С.Н. Основные вопросы отработки прочности ракетных конструкций // Космонавтика и ракетостроение, 1995. - № 4. - С. 6-23.
53. Карташов Г.Г., Ткаченко С.И., Комарова О.А. Прогнозирование устойчивости натуральных конструкций из композитных материалов на основе жесткостного критерия // Механ. композит. матер.- 1984.- N 1.- С. 124-130.
54. Каталог фирмы «PRODERA» INSEE 784.493.694.00011.
55. Кильдибеков И.Г., Лищюк А.А. Несущая способность подкрепленных панелей в акустическом поле // Прикладная механика. - 1971.- Т.7.- N 12.
56. Крайнов В.И., Шатилов Ю.В. Контейнер с управляемой системой виброизоляции // Материалы 2-го Российско-Китайского симпозиума по космической науке и технике. - Самара, 1990.- С.89.
57. Кудрин А.Б., Полухин П.И., Чиченев Н.А. Голография и деформация металлов. - М.: Металлургия, 1982. - 152 с.
58. Кузнецов А.А. Вибрационные испытания элементов и устройств автоматики. - М.: Энергия, 1976.- 120 с.
59. Лейв Г.Я. Способ измерения усилий. А.с. СССР N 118648.- Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товар. знаки, 1959.- N 6.- С. 37.

60. Мартынов А.К. и др. Стенд для испытания изделий на удар // РЖ. Метрология и измерит.техника. - 1983.- N 12.
61. Машины и приборы для программных испытаний на усталость / Под. ред. М.Э.Гарфа.- Киев: Наукова думка, 1970.- 195 с.
62. Медведев И.В., Андреев О.А., Воловик В.М. Горизонтальный стенд для ударных испытаний. А.с. СССР N 1045040.- 1983.
63. Метод фотоупругости / Под ред. Г.Л.Хесина.- М.: Стройиздат, 1975.- Т.1.- 461 с.; Т.2.- 368 с.; Т.3.- 312 с.
64. Надежность механических частей и конструкций летательных аппаратов / А.П. Кузнецов, А.А. Золотов, В.А. Комягин, М.И. Титов. М.: Машиностроение, 1979. 144 с.
65. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. Т. 5. Проектный анализ надежности / Под ред. В.И. Патрушева и А.И.Рембезы. М.: Машиностроение, 1988. 316 с.
66. Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Т. 4. Методы подобия в надежности/ Под. ред. В.А. Мельникова и Н.А. Северцева. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.
67. Новицкий В.В. Новые исследования по методу муаров // Расчет пространственных конструкций. - М.: Стройиздат, 1968.- Вып.П.- С.13-30.
68. Оболенский Е.П., Михеев Р.А. Экспериментальные методы исследования прочности конструкций летательных аппаратов. - М.: МАИ, 1982.- 72 с.
69. Образцов И.Ф., Иванов Ю.И. О системной методологии исследования прочности и проектирования конструкций летательных аппаратов // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации 1982.- М.: Наука, 1984.
70. Образцов И.Ф., Иванов Ю.И. Современные проблемы исследования прочности и проектирования сложных конструкций // Тез. докл. совещания Научные основы механики машин, конструкций и технологических процессов. - Фрунзе: Илим, 1982.
71. Онанов Г.Г. Асимптотический прогноз критической точки нелинейного процесса / Всесоюз. заоч. инж.-строит. ин-т (ВЗИСИ).- М., 1983.- 15 с.- Деп. в ВИНТИ 14.07.83, N 393189.
72. Онанов Г.Г. Прогноз критической точки нелинейного стационарного процесса / Всесоюз. заоч. инж.-строит. ин-т (ВЗИСИ).- М., 1984.- 66 с.- Деп. в ВИНТИ 13.06.84, N 3894-84.
73. Оптическая голография / Под ред. Г.Колфилда. Пер. с англ.- М.: Мир, 1982.- Т.1.- 374 с.; Т.2.- 735 с.
74. Отцов Е.А. Мощные электродинамические стенды // Вибростенды.- Л.: ЛДНТП, 1960.- С. 13-25.
75. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. Справочник. - М.: Машиностроение, 1983.- 248 с.
76. Пригоровский Н.И., Панских В.К. Метод хрупких тензочувствительных покрытий. - М.: Наука, 1978.- 184 с.
77. Прокопало Е.Ф., Сабуняк В.Ф. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек при статическом и динамическом нагружении // РЖ. Механика. - 1984.- N 1.
78. Ратнер С.И. и др. Механические свойства некоторых конструкционных сталей и сплавов при комнатной и повышенной температурах. - М.: Оборонгиз, 1957.- 256 с.
79. Рубцов А.А., Барт Ю.Я., Кашеев В.А. Расчетно-опытная методика оценки несущей способности реальных тонкостенных конструкций // Динам. и прочн. тонкостен. конструкций. - М.,- 1983.- С. 44-53.

80. Рудас И.В. Экспериментальные исследования устойчивости плоских пластин по методу Саусвелла // Вопр. проектир. и произв. констр. лет. аппаратов. - Харьков, - 1985.- С. 107-111.
81. Румшский П.З. Математическая обработка результатов эксперимента.- М.: Наука, 1971.- 191 с.
82. Саблин А.В. Пьезорезистивные датчики давления // Приборы и системы управления. - 1990.- N 10.- С. 8-9.
83. Самсонов В.Н. Анализ способов и средств стенов подвески изделий. – Самара.: СГАУ, 1996. -46с. –Деп. в ВИНТИ 24.07.96г., №2533-В96.
84. Самсонов В.Н. Методология создания вспомогательного стенового оборудования для динамических испытаний летательных аппаратов и их систем //Ракетно-космическая техника. Серия XII: Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. – Самара: ВКБ РКК «Энергия». -2000. –Вып.1. –С.162-169.
85. Самсонов В.Н. Принципы проектирования разгрузочных устройств динамических стенов и методы их обеспечения //Вестник СГАУ. Серия: Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Часть 2. Вып.3. –Самара, СГАУ, 1999. –С.46-49.
86. Самсонов В.Н., Ткаченко С.И., Комаров А.И. Разработка, исследование и создание средств обеспечения стеновых динамических испытаний летательных аппаратов и их систем // Сб. научно-технических статей по ракетно-космической тематике. Под ред. Козлова Д.И. –Самара. 1999. –С.242-261.
87. Самсонов В.Н., Ткаченко С.И., Черевань А.А. Опыт создания, проектирования и эксплуатации вспомогательного оборудования для вибрационных испытаний изделий РКТ // Сб. научно-технических статей по ракетно-космической тематике. Под ред. Козлова Д.И. –Самара. 2001. –С.227-233.
88. Самсонов В.Н., Токарев И.П. Выбор разгрузочного устройства для испытаний летательных аппаратов и двигателей // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. –Куйбышев, 1979, вып.6. –С.80-85.
89. Самсонов В.Н., Черевань А.А. Способ повышения точности вибрационных испытаний летательных аппаратов //Вестник СГАУ. Серия: Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Вып.4. Часть 2. –Самара, 2000. –С.152-159.
90. Саусвелл Р.В. Введение в теорию упругости.- М.: Гос. изд-во иностр. лит.- 1948.- 674 с.
91. Семенов В.А., Педоренко Н.П., Ворогибитов А.И. Тензорезисторные датчики давления // Приборы и системы управления. - 1990.- N 10.- С. 10-11.
92. Случайные колебания / Под ред. С. Кренделла.- Мир. - 1967.- 356 с.
93. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М.П. Малкова. - М.: Энергоатомиздат, 1985.- 432 с.
94. Строганов Р.П. Управляющие машины и их применение: Учебное пособие для вузов. - М.: Высш. школа, 1978.- 264 с.
95. Сухарев И.П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности. - М.: Машиностр., 1987.- 212 с.
96. Твердый Ю.В., Матвеев В.В. Прогноз запасов прочности конструкций при статических испытаниях // Оборонная техника. - ЦНИИТИ, № 9. - 1971.
97. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. - М.: Гостехиздат, 1946.- 532 с.
98. Ткаченко С.И. Способ определения критического усилия потери устойчивости. А.с. СССР N 890131.- Открытия. Изобретения. Пром.образцы. Товар. знаки, 1981.- N 46.- С. 212.

99. Ткаченко С.И. Неразрушающие исследования устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек // Вопр. прочн. и долговечн. элемен. авиацион. констр.: Межвуз. сб. / КуАИ им. С.П. Королева. Куйбышев, 1980.- С. 58-65.

100. Ткаченко С.И., Архипов А.П., Кравцов Ю.Т., Боровский А.М. Универсальный трансформируемый стенд для статических испытаний конструкций космических летательных аппаратов // Заводская лаборатория, 1995.- N 11.- С. 62-63.

101. Ткаченко С.И., Комарова О.А. Алгоритм прогнозирования потери устойчивости элементов конструкций в ходе испытаний / Деп. в ЦНТИ «Поиск», 1981 N 035-2785. -15 с.

102. Ткаченко С.И., Комарова О.А. Алгоритм прогнозирования устойчивости конструкций на основе комбинирования жесткостного метода с ультразвуковым // Вопр. прочн. и долговечн. элемен. авиацион. констр.: Межвуз. сб./ КуАИ им. С.П. Королева. Куйбышев, 1980.- С. 58-65.

103. Ткаченко С.И., Ткаченко О.А. Некоторые результаты использования АСУ «Прочность-К» при исследовании устойчивости несущих отсеков космических летательных аппаратов // Труды ЦСКБ: ЦНТИ «Поиск», 1990.

104. Ткаченко С.И., Фокин В.Т. Устройство для измерения сил, действующих на испытываемую конструкцию. А.с. СССР N 879300.- Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товар. знаки, 1981.- N 46.

105. Ткаченко С.И., Ткаченко О.А. Экспериментальная отработка прочности автоматических космических аппаратов. Центр. специализ. КБ.- Самара, 1996.- 290 с. /Деп. в ВИНТИ.№ 3285-В96.

106. Ткаченко С.И., Зорин Ю.В. Автоматизация процессов подготовки и управления неразрушающими статическими испытаниями космических аппаратов // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 1996. - №5-6 .- С.3-8.

107. Ткаченко С.И., Старков В.К., Лихачев Ю.Д. Система подготовки и управления статическими испытаниями космических аппаратов «СИГМА-М»// Надежность механических систем. Тез. док. - Самара, 1995.-С. 254.

108. Ткаченко С.И. Экспериментальной отработке прочности конструкций космических аппаратов - системный подход // Проблемы машиностроения и автоматизации. -№1.-1998.-С. 25-33.

109. Токарев М.Ф., Талицкий Е.Н., Фролов В.А. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие для ВУЗов / Под ред. В.А. Фролова.- М.: Радио и связь. - 1984.- 224 с.

110. Трофимов А.М., Быченков В.И. Растровые трансформаторные датчики перемещений // Приборы и системы управления. - 1990.- N 10.- С. 15-17.

111. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении.- Киев: Наукова Думка, 1981.- 381 с.

112. Филин Н.В., Буланов А.Б. Жидкостные криогенные системы. - Л.: Машиностр., 1985.- 247 с.

113. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Часть 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. - М.: Машиностр., 1974.- 3-е изд.- 368 с.

114. Цыганов В.И. Мизопова Г.П. Потенциометрические датчики линейных и угловых перемещений // Приборы и системы управления. - 1990.- N 10.- С. 14-15.

115. Шишкин В.В. Пневмогидравлический привод тягового устройства. А.с. СССР N 1523750.- Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товар. знаки, 1989.- N 43.

116. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: Справочник. - М.: Металлургия, 1978.- 304 с.

117. Шнейдорович Р.М., Левин О.А. Измерение полей пластических деформаций методом муара. - М.: Машиностр., 1972.- 152 с.

118. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Под ред. Б.С.Касаткина.- Киев: Наукова Думка, 1981.- 583 с.
119. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. - Киев: Изд-во АН УССР, ИЭС им. Е.О. Патона, 1983.- 210 с.
120. Юдин А.А. Акустическая эмиссия при пластической деформации металлов // Пробл. прочн.- 1985.- N 6.- С.92-106.
121. Abramovich H., Singer J. Correlation between vibration and buckling of stiffened cylindrical shells under external pressure and combined loading.- Israel journal of technology; 1978, 16, N 1-2, 34-44.
122. Ayrton W.E., Perry J. On structs.- Engineer, 1986, 62, N 10, 464-465; N 24, 513-515.
123. Becker H. Nondestructive testing for inelastic critical strength.- J. Sound and Vibration, 1977, 55, N 2, 157-163.
124. Becker H. Nondestructive testing for structural stability.- Journal of ship research; 1969, 13, N 4, 272-275.
125. Catalogue of CIS Environmental Test Facilities, RST Raumfahrt- und Sistemtechnik GmbH, Rostock, August 1994, TFA-RST-MAN-0001.
126. Chambers G.I., Simson S.C. Design of static and dynamic spacecraft structural qualification tests.- Lockheed Missiles Space Co. Inc., Sunnyvale, California, N 84, 1982, p. 666-673.
127. Datta P.K., Carlson R.Z. Buckling and vibration of a thin tensioned sheet with an elliptical hole.- Exper. mech., 1973, 13 N 7, 280-286.
128. Donnell L.H. On the application of Southwells method for the analysis of buckling tests.- Stephen Timoshenko 60th anniversary volume, Mc., Hillan book Co., 1938, 27-38.
129. Finance I.P.A. Methodes experimentales contribuant a la prevision des ruptures lors des essais de resistance sur structures complexes.- Aeronaut. et astronaut., 1979, N 5, 67-74.
130. Fisher H.R. An extension of Southwells method of analysing experimental observations in problems of elastic stability.- Proc. of the Royal Society, 1934, 144A.
131. Ford J.S. Parametric studies on the stability of stringer and ring reinforced circular shells.- Ph.D. thesis, Georgia inst. of tech., Atlanta, GA, 1970.
132. Foster C.G. Interaction of Buckling Modes in Thin – Walled Cylinders.- Exper.Mech., 1982, vol. 22, N 3, p. 124-128.
133. Graig J.I., Bailey S.C., Horton W.H. Nondestructive stability. Evaluation of large shell structures by dirut computer controlled testing. ISA ASI, 1972, vol.18, p.165-172.
134. Horton W.H. The Instability of unstiffened and Ring Stabilised Thin walled Circular Cylinders Under Non-Uniform Axial Zoned Conditions.- Israel Journal of Technology. 1968, vol.6, N 1-2, p. 11-24.
135. Horton W.H., Graig J.I. Experimental studies of the Effect of General Imperfections on the Elastic Stability of Thin Shells.- Israel Journal of Technology. 1969, vol.7, N 1-2, p. 91-103.
136. Horton W.H., Nassar E.M., Singhal M.K. Determiration of the critical loads of shells by nondestructive methods.- Exper. Mech., 1977, 17, N 4, 154-158.
137. Institute of environm. sci., Annual. Techn. Muting, Proc., v.1, N 2, 1967.
138. Institute of environm. sci., 15 th Annual. Techn. Muting, Proc., 1969.
139. Jones R.E., Greene B.E. The force stiffness technique for nondestructive buckling.- AIAA Paper, 1994, N 351, p. 1-8.
140. Leneman G. Noise of rockets, Space aeronaut., v.44, N 5, p. 75-83, 1965.
141. Lurie H. Lateral vibrations as related to structural stability. J. appl. mech., 1952, N 6, 195-204.

142. Lyon R.H. Random noise and vibration in space vehicles, 1967.
143. Murase Katuhiko, Iwamoto Takuya. Мэйдзе дайгаку рикогакубу кэнкю хококу.- Repts fac. sci. and technol. Meijyo univ., 1977, N 17, 94-103.
144. Reese D.R. A vibro-acoustic test system for simulation of Saturn V. dynamic launch environment on major space vehicle structures, SAE Conference, Proceeding, 1967.
145. Richards E.I., Mead D.I. Noise and acoustic fatigue in aeronautics, London, 1968.
146. Richardson J.M., Buckley M.J. Overview of probabilistic failure prediction and accept-reject decisions.- Rev. Progr. Quant. Nondestructive Eval. Proc. 8 th Air Force/Defence Adv. Res. Proj. Agency Symp., Boulder, Colo, 2-7 Aug. 1981. vol.1, New York, London, 1982, 43-58.
147. Rosen A., Singer J. Vibration of axially loaded stiffened cylindrical shells with elastic restraints.- Int. j. solids struct., 1973, 12, N 7, 577-578.
148. Skogh J., Stern P., Brogan F. Instability analysis of Skylab structure.- Computers and structures, 1973, 3, N 5, 1219-1240.
149. Sommerfeld A. Eine Einfache Vorrichtung zur Veranschaulichung des Knickungsvorgangen.- ZVDI, 1905, 1320-1323.
150. Southwell B.V. Proc. roy. soc., London, Series A, 1932, 135, 601-616.
151. The shock and vibration bull., N 37, p.5, 1968, N 38, p.1-3, 1968, N 39, p.1-6, 1968-1969.